

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie

Zaměření
Strojírenská metalurgie



Studijní program **M 2301** Strojní inženýrství
Studijní obor **2303T002** Strojírenská technologie

SLEDOVÁNÍ OZÁŘENÉ GRAFITICKÉ LITINY LASEREM

WATCHING GRAPHITE CAST IRON IRRADIATED BY LASER

Tomáš DĚDEČEK

KSP – SM – 534

Vedoucí dipl. práce: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Vedoucí katedry: Doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 83

Počet tabulek: 18

Počet obrázků: 56

Počet příloh: 0

23.5. 2008

Stránka pro originál zadání dipl.práce

A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství
Diplomant: Tomáš Dědeček
Téma práce: Sledování ozáření litiny laserem

Číslo DP: KSP-SM- 534
Vedoucí DP: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Abstrakt:

Diplomová práce pojednává o technologickém procesu laserového zpracování litiny. V první části jsou shrnuty základní poznatky o litinách, laseru a možnostech tohoto technologického postupu. Praktická část je věnována studiu mikrostruktury litiny s lupínkovým grafitem, litiny s červíkovým grafitem a litiny s kuličkovým grafitem po ozáření laserem. Pro doplnění výsledků byla změřena i mikrotvrdost jednotlivých vzorků litin.

Abstract:

The diploma paper deals with technological process of processing cast iron by laser.
The primary knowledge about cast iron, laser, and possibilities of this technological method is resumed in the first part of this diploma paper.
In practical part I focus in studying microstructure of cast iron with laminated graphite, cast iron with wormed graphite and cast iron with spheroid nodular graphite after irradiating by laser.
It was measured microhardness different tested sample of cast iron for filling results.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou (diplomovou) práci vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 23. května 2008

.....
Tomáš Dědeček

***Diplomová práce vznikla za podpory řešení výzkumného záměru MSM
4674788501.***

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu této práce prof. Ing. Ivě Nové CSc. za odborné vedení a pomoc při řešení dané problematiky. Dále děkuji všem ostatním pracovníkům KSP, kteří mi pomohli při řešení úkolů této práce.

Tomáš Dědeček

V Liberci 23. května 2008

Obsah

1.	Úvod	7
2.	Teoretická část práce	9
2.1	LASER	9
2.1.1	Popis laseru	9
2.1.2	Parametry ovlivňující výkon laseru.....	12
2.1.3	Porovnání nejpoužívanějších laserů	17
2.1.4	Využití v prům. výrobě	17
2.2	Interakce litiny a laseru	20
2.2.1	Charakteristika grafitických litin	20
2.2.2	Chemické složení grafitických litin	22
2.2.3	Důvody dodatečného tech. Zpracování	25
2.2.4	Kalení	26
2.2.5	Princip transf. zpevnění slitin železa s uhlíkem	28
2.3	Interakce Laseru a litiny	29
2.3.1	Transformační zpevnění litiny	29
2.3.2	Transformační zpevnění bez natavení	30
2.3.3	Transformační zpevnění s natavením	30
2.3.4	Fázové přeměny ohřevu litiny laserem	35
2.3.5	Austenitizace litiny	35
2.3.6	Difúze uhlíku z grafitu	36
3.	Experimentální část práce	38
3.1	Příprava vzorků pro metalografické pozorování	38
3.2	Hodnocení výchozího stavu litiny	39
3.2.1	Hodnocení výchozího stavu litiny s lupínkovým grafitem...	39
3.2.1.1	Vyhodnocení vzorků	42
3.2.2	Hodnocení výchozího stavu litiny s červíkovým grafitem	49
3.2.2.1	Vyhodnocení vzorků	51
3.2.3	Hodnocení výchozího stavu litiny s kuličkovým grafitem	56
3.2.3.1	Vyhodnocení vzorků	58
3.3	Hodnocení mikrotvrdosti	62
4.	Diskuze	73
5.	Závěr	76
6.	Seznam použité literatury	78

1. Úvod

Jedním ze znaků rychle rostoucí populace na zeměkouli je vzrůstající spotřeba energie a surovin. V posledních letech bylo za pomoci úsporných opatření a lepším využitím přeměny energie dosaženo spotřeby konstantní či jen malého nárůstu spotřeby. Z širšího hlediska nemá tato strategie do budoucna vyhlídky, protože odborníci předpokládají spíše ohromný vzrůst spotřeby energie. S ohledem na rostoucí ceny surovin, energií a práce se jako jedno z řešení nabízí zavádět do praxe nové technologie, které mají lepší využití energie a nižší odpadovost. Jednou z těchto technologií je i kvantový zesilovač světla – LASER. Své uplatnění nachází i ve strojírenství.

Proces dodatečného tepelného zpracování je vysoce energeticky náročný. Povrchové zpevnění materiálu se vyznačuje řadou specifík, hlavně proto, že se jedná o zpevnění lokální, tedy jen v místech jejich opotřebení se zachováním původních vlastností materiálu ve zbývajícím objemu.

Jedním z příkladů využití laseru ve strojírenství je povrchové tepelné zpracování materiálu. Jedná se zde převážně o tepelné zpracování povrchových vrstev materiálu. Jde o technologický proces s velkým potenciálem využití pro zlepšování vlastností materiálů, součástí strojů a zařízení.

Při konvenčním ohřevu zasahuje teplo i do nežádoucích vrstev materiálu. Naopak základ principu zpracování laserem je v rychlém ohřevu materiálu laserovým paprskem v tenké povrchové vrstvě a jeho rychlém ochlazení odvodem tepla do okolního materiálu, přičemž dochází k fázovým změnám. Na materiál působí se soustředěným laserovým paprskem. Po dosažení intenzity 10^5 W cm^{-2} , dojde k tavení kovu. V povrchové vrstvě pod světelnou skvrnou vznikne oblast taveniny. Materiál v okolí světelné skvrny odvádí teplo z této oblasti díky tepelné vodivosti a současně se i sám ohřívá. Hloubka tepelného ovlivnění záleží na intenzitě laserového paprsku. Bude-li intenzita větší než 10^7 W cm^{-2} , začne současně s tavením docházet i k odpařování kovu, což má za následek vznik jamky. Při tomto technologickém postupu nedochází ke vzniku celistvé povrchové

zakalené vrstvičky, která je křehká a náchylná k praskání a odlupování. Proces zpevnění laserem lze provádět i v dutinách součástí za pomoci optických soustav.

Z výše uvedeného je patrné, že se tato poměrně jednoduchá technologie vyznačuje současně ekonomičností i efektivností výroby. Tato technologie také dovoluje tepelně zpracovávat součásti, u nichž by zušlechtění konvenčními metodami nebylo možné (např. tloušťka stěny, tepelné ovlivnění celé součásti). Laserová technologie je také mimořádně výrobně flexibilní, kdy lze měnit technologické vlastnosti výroby pouze změnou intenzity paprsku laseru.

Tato práce je zaměřena na laserové zpracování grafitické litiny kontinuálním laserem CO₂, sledování změny struktury mikrotvrdosti ozářené litiny.

2. Teoretická část práce

2.1 LASER

LASER je zkratka z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“. Jedná se o zdroj optického elektromagnetického záření tj. o zdroj vyzařující světlo ve viditelné oblasti nebo v blízkém okolí. Světlo je z laseru vyzařováno ve formě úzkého svazku; na rozdíl od světla přirozených zdrojů je polarizované, koherentní a monochromatické. Polarizované – vlnění kmitá jen v jedné rovině. Koherentní – se stálým fázovým rozdílem. Monochromatické – vyzařuje ve velmi úzkém pásmu vlnových délek. Princip laseru využívá zákonů kvantové mechaniky a termodynamiky. Laser však dokáže svářet, řezat a obrábět. Aplikace laseru je založena na působení na neprůhledná prostředí. Při odevzdání energie laseru do zpracovávaného materiálu dojde k rozkmitání mřížky pevné látky, čímž dojde ke zvětšení střední kinetické energie atomů a molekul látky.

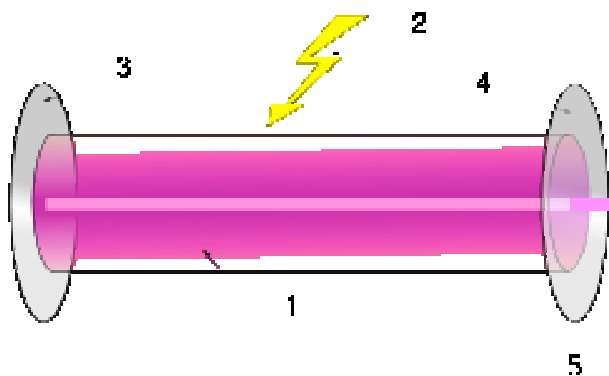
2.1.1 Popis laseru

Laser je v podstatě tvořen: aktivním prostředím (1), rezonátorem (3,4) a zdrojem energie (2), schéma základních částí laseru je na obr. 2-1.

Podle aktivního prostředí se

lasery dělí na:

- a) plynové;
- b) kapalinové;
- c) pevnofázové;
- d) polovodičové.



Obr. 2-1 Schéma laseru

V praxi se nejčastěji využívají lasery plynové, jejichž aktivní prostředí je založeno na směsi plynů : CO_2 , N_2 , He . Tyto se krátce nazývají CO_2 lasery. Dále jsou na bázi argonové, kryptonové, dusíkové a s parami kovů.

Plynové lasery využívají mnoho různých plynů. Druh plynu určuje vlnovou délku záření a tím i využitelnost laseru., jak ukazuje schéma na obr.2-2. Je to jeden z nejstarších typů laseru.



Argon-iont lasery vysílají světlo v rozsahu vlnové délky 351-528.7 nm. V závislosti na optice a laseru je použitelné velké množství vlnových délek, ale nejběžněji užívané délky jsou 458 nm, 488 nm a 514.5 nm.

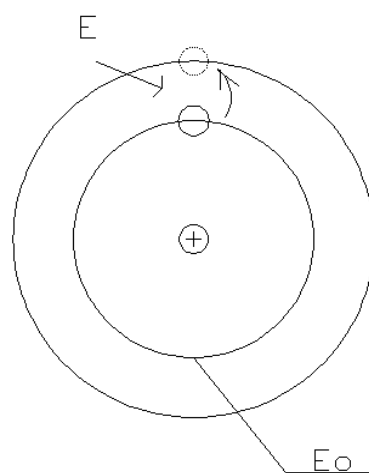
Speciální využití mají lasery kov-ion. Tyto lasery vysílají hluboké UV záření s velmi malým rozptylem. Helium-stříbro (HeAg) 224 nm a neon-měď (NeCu) 248 nm jsou dva příklady. Využívají se např. ve spektrografii.

Velmi důležitou částí laseru je rezonátor, kterým u většiny laserů opakovaně prochází světelný paprsek. Rezonátor je tvořen optickou dutinou vymezenou zrcadly. V rezonátoru je elektromagnetické záření vlivem interference zesilováno. V nejobvyklejších případech je rezonátor tvořen dvěma zrcadly, z nichž je jedno zcela odrazivé a druhé částečně propustné.

Základní podmínkou funkce laseru je dosažení převahy stimulované emise nad spontánní emisí a absorpcí. Zdrojem energie, který může představovat například výbojka, je do aktivního média laseru dodávána energie. Ta energeticky vybudí elektrony v médiu aktivního prostředí ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny, dojde k tzv. excitaci. Takto je do vyšších energetických stavů vybudena většina elektronů aktivního prostředí a vzniká tak tzv. inverzní populace. Při opětovném přestupu elektronu na nižší energetickou hladinu dojde k vyzáření (emisi) kvanta energie ve formě fotonů. Tyto fotony následně interagují s dalšími elektrony inverzní populace, čímž spouštějí tzv. stimulovanou emisi fotonů, se stejnou frekvencí a fází. Díky umístění aktivní části laseru do rezonátoru, tvořeného například zrcadly, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovnému průchodu prostředím. To dále podporuje stimulovanou emisi, a tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Výsledný světelný paprsek pak opouští tělo laseru průchodem skrze polopropustné zrcadlo.

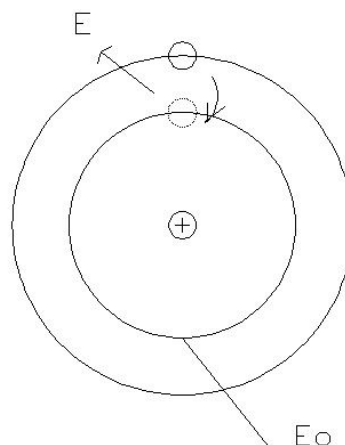
Za standardních podmínek se atomy aktivní látky nachází v kvantovém stavu s nejmenší energií. V základním stavu se elektron pohybuje jen ve vymezených energetických hladinách. Tím je dáno, že změny energie elektronů probíhají pouze skokově, přechodné stavy neexistují. Model atomu má kvantový charakter.

Schéma na obr.2-3 znázorňuje přechod elektronu ze základní energetické hladiny E_0 , kdy dojde k absorpci nebo emitaci určité hodnoty energie. Tato energie se nazývá kvanto a jedná se o elektromagnetické záření o určité vlnové délce s hodnotou rozdílu energií mezi sousedními hladinami.



Obr. 2-3 Schéma absorpce energie

Atom, který z vnějšku pohltil kvantum energie a jako důsledek tohoto přešel do stavu o vyšší energii, se může vrátit do základního stavu odevzdáním přebytečné energie, jak je vidět na obr. 2-4 /emitovaná energie/. Jedním ze způsobů odevzdání této energie je spontánní emise formou elektromagnetického záření.



Obr.2-4 Schéma přestupu elektronu na nižší energetickou hladinu

Energii laseru lze určit na základě dle kvantové teorie světla a platí vztah :

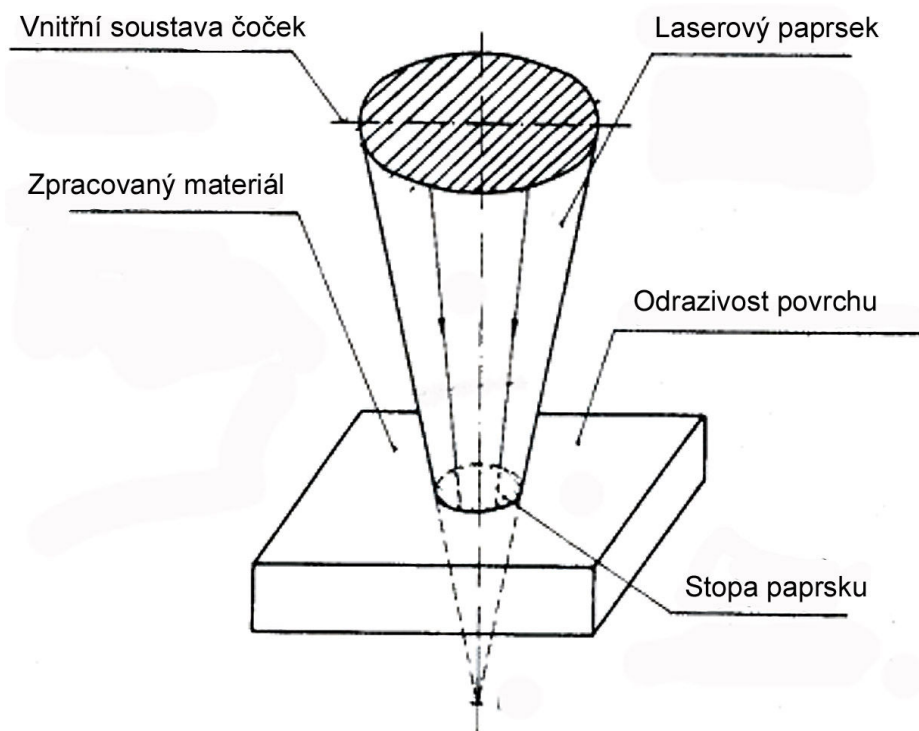
$$E = h \cdot f, \quad (2.1)$$

kde značí: h - Planckovu konstantu;

f - značí rezonanční frekvenci.

2.1.2 Parametry ovlivňující paprsek laseru

V technologických aplikacích se používají převážně lasery s vlnovou délkou z intervalu 0,10-3 mm.



Obr. 2-5 Schéma ovlivnitelnosti materiálu laserem

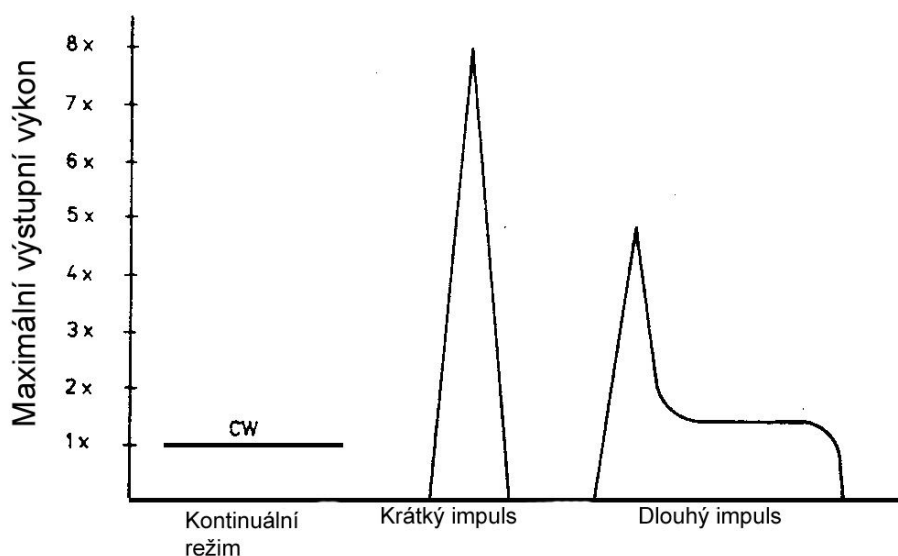
Energii laseru ovlivňují tyto základní parametry:

- a) Výkon laserového svazku [W]
- b) Hustota energie svazku [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$]. Je energie svazku dopadající na jednotku plochy kolmé ke směru šíření svazku paprsků
- c) Špičkový výkon laseru [W]. Toto je maximální možná energie, kterou je laser schopný vyzářit v jediném okamžiku.
- d) Střední výkon laseru [W]. Je energie odevzdaná za 1s.
- e) Intenzita [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]. Je to výkon připadající na jednotku plochy kolmé ke směru šíření svazků paprsků.
- f) Opakovací frekvence [Hz]. Určuje počet pulsů vyzářených za 1s. Tato informace má smysl pouze u pulsních laserů

Dále můžeme lasery rozdělit podle způsobu vyzařování na:

- a) Kontinuální - vyzařují spojitý nepřetržitý svazek paprsků
- b) Pulsní – vyzařují svazek paprsků nespojitě v krátkých pulsech

Energii jednotlivých způsobů vyzařování ukazuje obr. 2-6.



Obr.2-6 Kontinuální a pulsní režim

Protože špičkový výkon je nepřímo úměrný délce impulsů, může v případě laserů s krátkými pulsy dosahovat vysokých hodnot. Z tohoto důvodu jsou pulsní lasery charakterizovány vyššími výkony než lasery kontinuální. Pulsní lasery mají i další výhody při zpracování materiálu, jsou to:

- Vysoká hustota energie impulsu, což zvyšuje absorpci záření u materiálů s vysokou odrazivitou,
- Snížení objemového ohřevu materiálu při jeho zpracování laserem v důsledku krátké doby interakce laserového svazku s materiálem,
- Možnost provedení různých vysokorychlostních operací v důsledku rychleno ohřevu a následného zhasínání paprsku

Výkon laseru ovlivňují i optické vlastnosti. Tyto se řídí zákony optiky elektromagnetického vlnění. Mezi tyto vlastnosti patří:

- Koherence – možnost emitace paprsků záření jehož frekvence je stále stejná a rozdíl fází vyzařovaných paprsků se nemění.
- Monochromaticnost – schopnost emitace paprsků o stejné vlnové délce

Velký stupeň koherentnosti a velmi malá divergence paprsku umožňují zkoncentrovat laser optickými zařízeními do průměrů 0,05 až 0,25 mm, takže hustota energie laseru v místě jeho interakce s materiálem je potom větší než 106 až 109 W.cm-2, což umožňuje dosáhnout v ultrakrátkém čase - několika nanosekund - v této lokalitě teplotu až 2500 K.

Výsledek interakce laserového paprsku s materiálem podstatně závisí na součiniteli absorpce laserového paprsku v materiálu. Velikost tohoto součinitele určují:

- a) Druh materiálu,
- b) Stav jeho povrchu a teplota,
- c) Vlnová délka laseru.

Absorpce/obr.2-5 odrazivost povrchu/ se zvětšuje zmenšením vlnové délky laseru, zvýšením teploty materiálu, úpravou povrchu materiálu (zvětšení nerovnosti povrchu, nekovová vrstva, předcházející poškození povrchu laserem apod.). Převážně se využívá antireflexních povlaků. Čisté kovové povrchy mají odrazivost asi 90%, což je velmi mnoho. V praxi lze snížit odrazivost pomocí antireflexních vrstev až na 60%. Antireflexní povlaky by měly mít následující vlastnosti:

- a) Snadno a rovnoměrně nanositelné
- b) Snadno odstranitelné
- c) Odolnost vysokým teplotám
- d) Ekologičnost
- e) Vysoká tepelná vodivost
- f) Dobrá přilnavost k základnímu materiálu
- g) Minimální reaktivnost
- h) Maximální pohltivost paprsku

V praxi se nejčastěji používají povlaky grafitu, nátěry s obsahem sazí a manganové fosfáty.

Z ostatních vlastností materiálů je důležité tepelná vodivost, viz. obr.2-5 vlastnost zpracovávaného materiálu - malá tepelná vodivost je výhodná pro dosažení

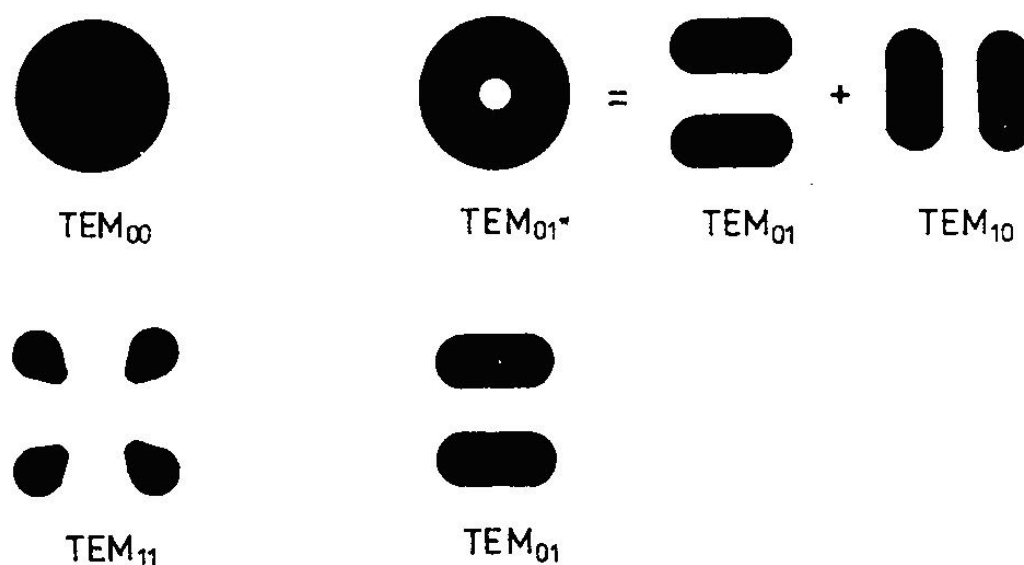
vysoké teploty v místě interakce laserového paprsku s materiálem (obrábění, dělení), velká tepelná vodivost zase tehdy, když se má splnit požadavek minimalizace vypařování kovu v první fázi této interakce (tepelné zpracování, svařování, apod.).

O velikosti odevzdané energie laseru do materiálu významně spolurozhoduje sbíhavost paprsku, viz. obr.2-5 soustava čoček, která se musí maximalizovat, a poloha ohniska laserového paprsku vzhledem k zpracovávanému povrchu. Největší energetické ovlivnění materiálu se dosáhne ztotožněním ohniska laserového paprsku s povrchem materiálu. Některé technologické operace však vyžadují velkou šířku stopy laserového paprsku při menší požadované energii. Dosáhne se toho rozostřením laseru vzhledem k povrchu materiálu.

Pro technologické využití laseru je třeba dále uvažovat :

- a) Příčný profil svazku – rozložení intenzity energie v paprsku v rovině kolmé na směr šíření
- b) Příčný mód - charakterizuje rozdělení intenzity záření přes průřez svazku. Používá se pro něj anglické zkratky TEM (transverse electromagnetic mode). Jednotlivé módy se označují TEM s indexy roviny ij , kde i a j udávají počet uzlů ve dvou vzájemně kolmých směrech.

Nejčastěji se využívá mód TEM_{00} , který představuje nejvyšší symetrii nebo TEM_{01} . Nepoužívanější módy jsou na obrázku 2-7.



Obr. 2-7 Schéma modů TEM

2.1.3 Porovnání nejpoužívanějších laserů

V dnešní době jsou v průmyslové výrobě nejvyužívanější dva druhy laseru: Nd:YAG a CO₂.

Kvalita paprsku z pevného laseru Nd:YAG je při výkonu nad 4 kW při 12 mm x mrad sice mimořádně veliká, přesto však nejsou mnohá data CO₂-laseru dosažitelná. Především malé provozní a údržbové náklady CO₂-laseru umožňují jeho hospodárné užívání. Tyto náklady činí např. při 3kW-CO₂-Slab-laseru ca 130kč za hodinu při 40 tis. provozních hodin. Při snížení výkonu laseru o více než polovinu se ve srovnání s konvenčním laserem dosáhne při stejné rychlosti svařování 1,5 m/min téměř stejná hloubka průvaru. Při stejné hloubce průvaru 4 mm v oceli a srovnatelném výkonu laserů svařuje Nd:YAG-laser jen poloviční rychlostí. Teprve při použití v trojrozměrném prostoru na vícesém robotu jsou celkové investiční náklady u Nd:YAG-laseru nižší než u plynového. Důvodem pro to je jednodušší vedení paprsku u pevného laseru pomocí světelných vodivých vláken. Pomocí skenerové optiky je možno paprsek na ploše volně polohovat. Fokusační čočka namontovaná na saních lineárního motoru může pracovní bod volně polohovat v prostoru. Pomocí pojízdné zrcadlové jednotky je možno dosáhnout svarová místa i za rušícími hranami.

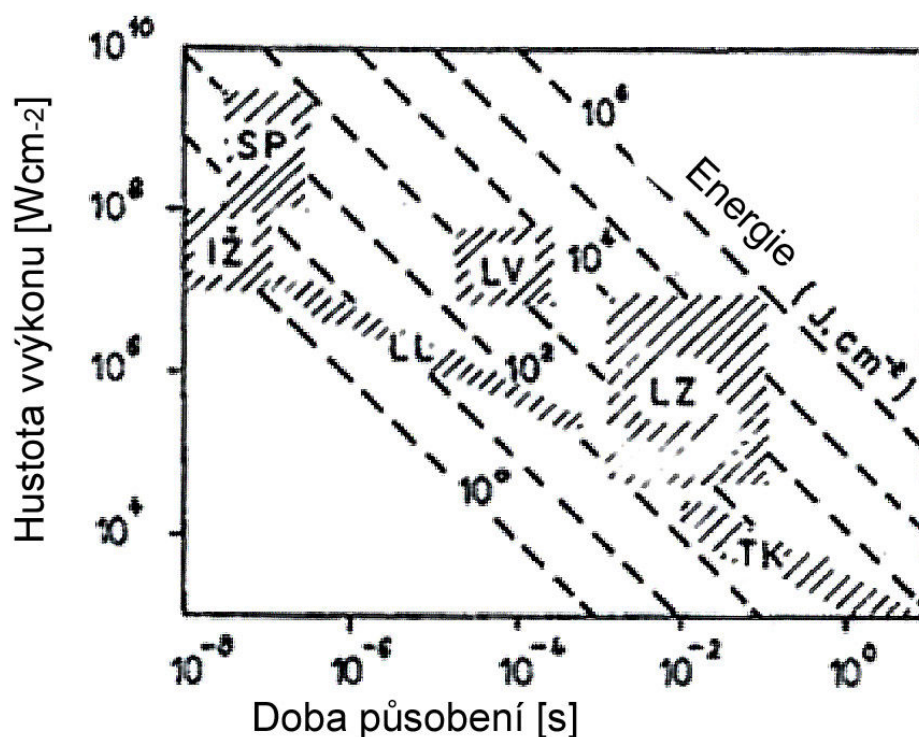
2.1.4 Využití laseru v průmyslové výrobě

Nasazení laserů a laserových technologií přineslo další dimenzi do průmyslové výroby. Toto si vyžádaly stále rostoucí požadavky na zvyšování kvality a efektivity. Moderní laserové systémy a technologie předčí klasické nástroje kombinací rychlosti, přesnosti, výkonnosti a flexibility. Nenáročná obsluha a údržba umožňují okamžité a spolehlivé začlenění do výrobního procesu.

Laserové technologie je vhodné rozdělit do základních skupin podle dosažené teploty materiálů, jak je vidět na obr. 2-8

- a) Technologie s ohřevem materiálu na teploty nižší než solidus: laserové tepelné zpracování (žíhání, kalení, popouštění, vytvrzování aj.), laserové chemicko-tepelné zpracování a některé druhy laserového obrábění.

- b) Technologie s ohřevem materiálu na teplotu vyšší než solidus a nižší než teplota vypařování materiálu: natavení povrchu, amorfizování, povrchové legování, navážení, implantování fází, svařování, stříkání, zónová rafinace aj.
- c) Technologie s ohřevem materiálů na teplotu vyšší než solidus a nižší než teplota tavení materiálu, tj. i na teplotu vyšší než je teplota vypařování materiálu: vrtání, dělení, povlakování a výroba speciálních depozit, žlábkování, gravírování, deformační zpevnění materiálů laserovou šokovou vlnou, označování výrobků apod.



Obr. 2-8 Laser v technologických procesech (IŽ - laserové žíhání, LL - laserové leštění, LV - laserové obrábění, LZ - laserové svařování, TK – laserové kalení, SP - zpevňování kovů laserem - šokem)

V této práci se soustředíme na první bod z tohoto rozdělení, tj. na laserové tepelné zpracování kovových materiálů, kdy se využije laser na ohřev materiálu na teplotu nižší než je teplota solidu. Energetické ovlivnění materiálu je řízeno řídí, aby se neuskutečnilo vypařování kovu. V opačném případě dojde k vypalování lupínků grafitu, které ústí na povrchu. Tato vada se nazývá degrafitizace. Využívá se zde

množství specifických vlastností laseru a již dříve uvedených předností, především však mimořádné rychlosti startu a ukončení operace, možnosti definovaného tepelného ovlivnění povrchových vrstev materiálů posuzované z hlediska lokalizace, hloubky, plochy, objemu, nerovnosti povrchu, minimální deformace, mechanického působení na materiál, vlastností apod. Proces laserového tepelného zpracování je tedy ve všech fázích extrémně rychlý, je plně automatizovatelný a předurčený pro robotizované automatizované technologické systémy. Tepelné zpracování je možné v obvyklé atmosféře. Početné laserové operace jsou konečné, provádí se ve výrobních linkách a nebo v montážních linkách. Možnost přivést laserový paprsek ze vzdáleného zdroje na pracovní místo optickými cestami představuje ve spojení s robotem úplně novou organizaci práce v tepelném zpracování kovových materiálů. Umožňuje programovanou distribuci laseru ze zdroje do cechů tepelného zpracování, dělení kovů, svařování, naváření, povrchové depozice speciálních vrstev apod. Přitom se zpracovávají jen funkční plochy výrobků, šetří se energie na ohřev celého výrobku, bezproblémové je tepelné zpracování složitých ploch, otvorů a podobně - nepřístupných induktorům a nebo plamenovému ohřevu. Často se oceňuje ostrá lokalizace ohřevu, velmi malé tepelné ovlivnění základního materiálu, malé distorze a deformace výrobků.

Dodnes se aplikace laseru v tepelném zpracování kovů orientovaly především na některé druhy žíhání (rekrytalizační žíhání, žíhání povrchových vrstev, iontovo-implantovaných vrstev apod.), na kalení a na vytvrzování vhodných slitin. Všechny těchto případech je třeba vyzvednout řízení procesu zpracování k dosažení požadovaného strukturního stavu, které se opírá o přesnost dávkování energie a doby impulsu laserového působení.

Plynový laser(CO_2) využijeme i my pro tepelné zpracování vzorku. CO_2 lasery mohou vysílat záření o výkonu stovek kilowatů v rozsahu vlnových délek $9.6\text{ }\mu\text{m}$ a $10.6\text{ }\mu\text{m}$, a jsou často používány v průmyslu pro výpalování a svařování.

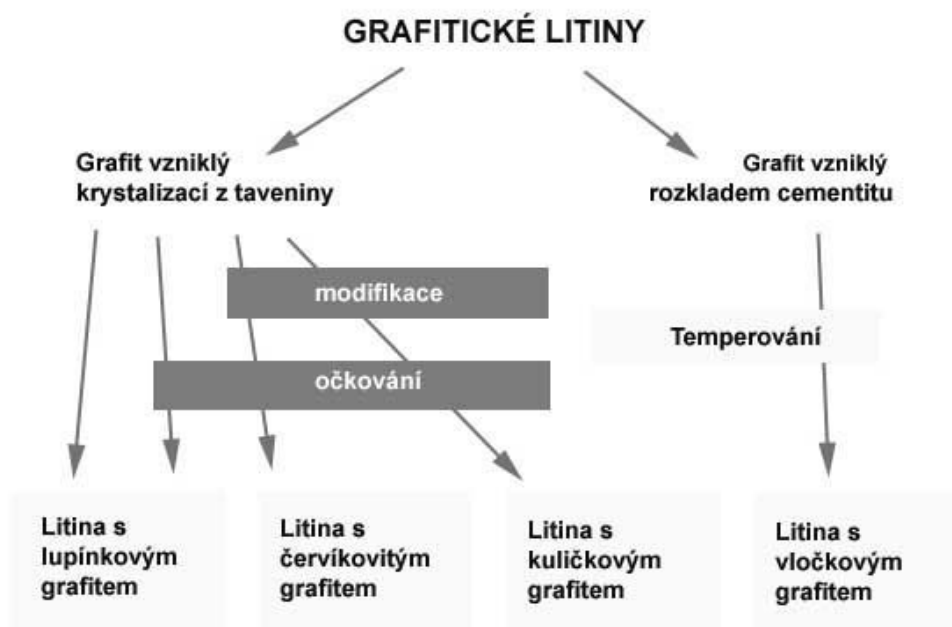
Účinnost CO_2 laseru je kolem 10%.

2.2 Interakce litiny a laseru

2.2.1 Charakteristika grafitických litin

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a některých dalších doprovodných prvků, ať žádoucích nebo nežádoucích, kde je obsah uhlíku nad 2% hmotnosti objemu a množství doprovodných prvků nepřesáhne 2% hmotnosti objemu.

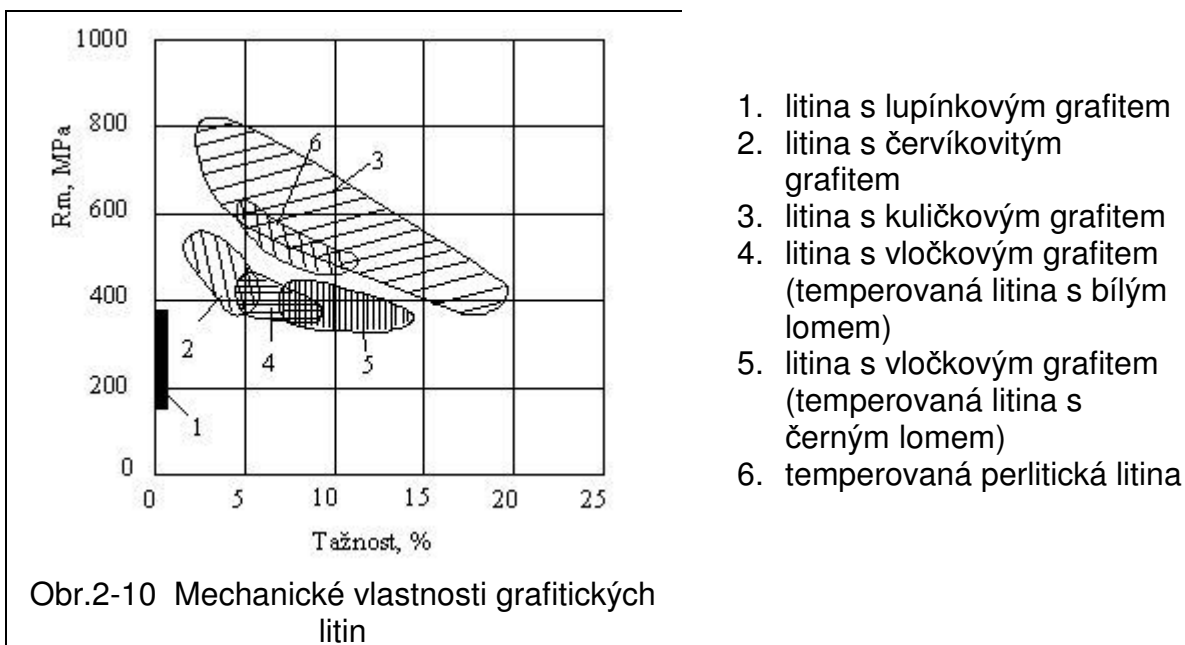
Grafitické litiny jsou takové, u kterých je výsledná struktura tvořena uhlíkem ve formě grafitu, který krystalizuje v šesterečné soustavě, a základní kovovou hmotou, nazývanou matrice. Základním kritériem při rozdělení grafitických litin je tvar vyloučeného grafitu. Grafit může vznikat krystalizací z taveniny nebo grafitizací cementitu v tuhém stavu. Krystalizace grafitu se může ovlivnit úpravou taveniny přidáním látek, které ovlivňují počet krystalizačních zárodků tzv. „očkováním“ nebo tvar zárodků tzv. „modifikací“, podle obr. 2-9.



Obr. 2-9 Schéma rozdělení grafitických litin

Vlastnosti grafitických litin závisí na množství, tvaru a velikosti grafitických částic a na druhu kovové matrice, ve které je grafit rozložený. Matrice může mít různý podíl feritu a perlitu.

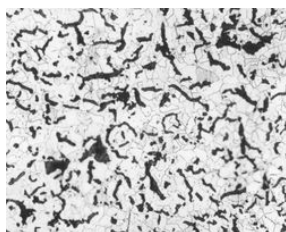
Litina s vyšším obsahem perlitu v matrici má vyšší pevnost a nižší tažnost. Charakteristické mechanické vlastnosti jednotlivých druhů grafitických litin jsou znázorněné na obr. 2-10.



Jednotlivé druhy litin můžeme srovnat podle mechanických vlastností v pořadí litina s lupínkovým grafitem, viz obr. 2 -11a, litina s červíkovým grafitem, viz obr. 2 -11b a litina s kuličkovým grafitem, viz obr. 2 -11c. V tomto pořadí se zvyšují mechanické vlastnosti litin (pevnost v tahu, houževnatost a tažnost). Naopak slévatelnost a obrobitelnost se zhoršují. Mechanické vlastnosti závisí nejen na tvaru a velikosti grafitu, ale i na matrici (feritická, feriticko-perlitická, perlitická), ve které je uložen grafit. Se zvyšujícím se podílem perlitu ve struktuře narůstají pevnostní charakteristiky a naopak tažnost či houževnatost klesají. V tabulce 2-1 jsou uvedeny mezní hodnoty vlastností jednotlivých litin.



a)



b)



c)

Obr. 2 – 11 Základní struktury litin

Tabulka 2-1 Přehled základních typů grafitických litin a mechanických vlastností dle PLUHAŘE [29]

Typy litin	Feritická matrice	Feriticko-perlitická matrice	Perlitická matrice
Litina s lupínkovým grafitem	100-155HV Rm=100-200MPa	120-195 HV Rm=150-300MPa	145-215 HV Rm=250-350Mpa
Litina s kuličkovým grafitem	Rm=350-400MPa A=15-22%	Rm=400-600MPa A=3-10%	Rm=600-900MPa A=2%
Litina s vermikulárním grafitem	Mechanické vlastnosti leží mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem.		

2.2.2 Chemické složení grafitických litin

Základní kovová hmota u grafitických litin může být velmi různorodá. Nejčastěji je matrice tvořena feritem, perlitem a nebo jejich kombinací v různém poměru. Tato matrice se může měnit i vlastnostmi tepelného tváření.

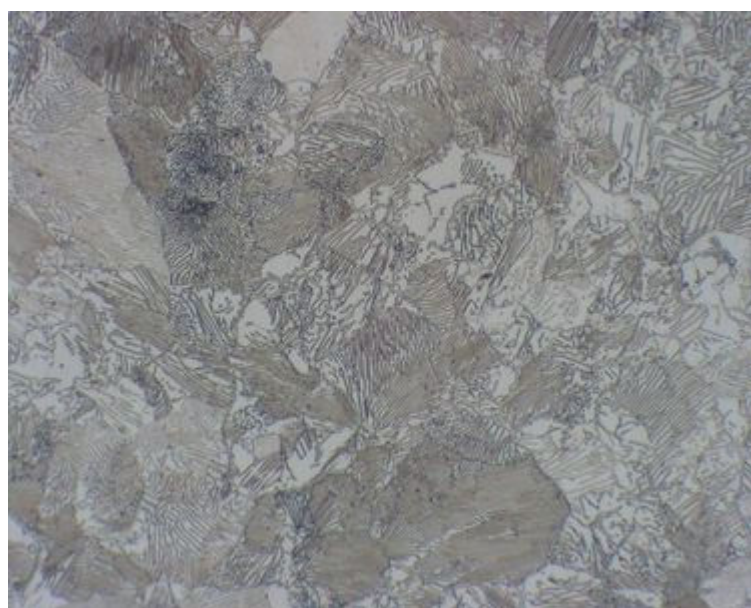
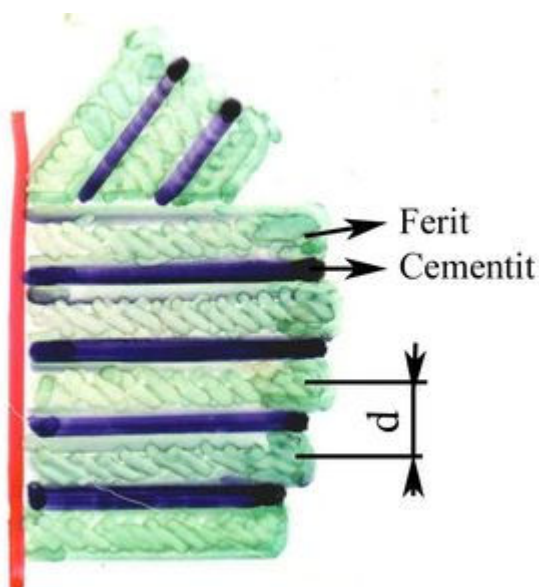
Struktura základní kovové hmoty závisí na:

- chemickém složení litiny
- rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí (závisí na tloušťce stěny odlitku a na materiálu formy)
- stavu krystalizačních zárodků
- tepelném zpracování

Základní kovovou hmotu v nelegovaných litinách tvoří ferit, perlit, případně ledeburit. Legováním nebo tepelným zpracováním lze získat matici, která obsahuje austenit, martenzit, bainit nebo komplexní karbidy.

Ferit vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního systému. Přísadový prvek křemík a pomalé ochlazování podporuje vznik feritu. Ferit je měkký, tvárný, dobře obrobitelný, v litinách je nositelem houževnatosti. Na jeho vlastnosti mají značný vliv legury a doprovodné prvky, které se železem tvoří substituční tuhý roztok. Všechny přísady zvyšují tvrdost a pevnost feritu. Jeho houževnatost některé z nich zvyšují (Ni, Cr, Mn) a jiné je snižují (Si).

Perlit je eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Vedoucí fází perlitické přeměny je cementit, vedle něhož pak vznikají lamely feritu. Z jednoho zrna austenitu obvykle vzniká několik zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel. Jeho vznik podporuje měď. Ve srovnání s feritem má perlit vyšší pevnost a tvrdost, horší plastické vlastnosti, horší obrobitelnost, vyšší odolnost proti opotřebení. Perlit je v litinách nositelem pevnosti a tvrdosti. Jeho vlastnosti závisí na hustotě perlitu dané jeho dispersitou d . Ta je určena vzdáleností dvou sousedních lamel feritu na obr.2-12. Čím hustější je perlit, tím vyšší jsou jeho mechanické vlastnosti.



Obr. 2 - 12 Disperzita litiny

Austenit se za normálních teplot vyskytuje pouze v niklem legovaných litinách nebo jako zbytkový austenit po tepelném zpracování. Je měkký, velmi tvárný, odolný vůči korozi a proti působení vysokých teplot.

Cementit je u nelegovaných ocelí tvořen karbidem železa Fe_3C . U legovaných litin mohou být atomy Fe nahrazeny Mn, Cr, W, V nebo Mo. Je velmi tvrdý a křehký. Při vyšším obsahu ve struktuře se litina stává neobrobitelnou.

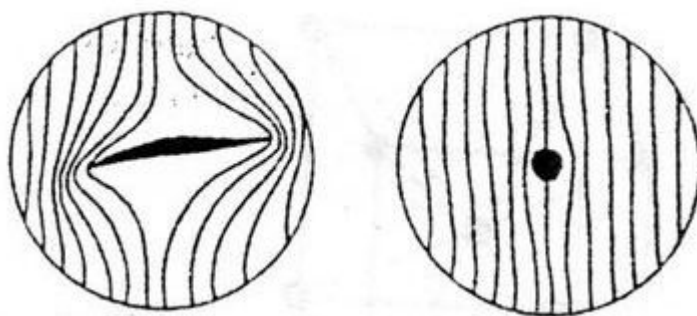
Ledeburit je eutektikum v metastabilní soustavě Fe- Fe_3C . Je tvořeno austenitem a ledeburitickým cementitem. Při eutektoidní teplotě se austenit transformuje na

perlit a vzniká tzv. transformovaný ledeburit. Ledeburit je jednou se základních složek bílých litin. V grafitických litinách vzniká v místech s rychlým odvodem tepla, kterým se říká zákalka.

Martenzit vzniká bezdifúzním rozpadem austenitu při kalení nelegovaných nebo legovaných litin. V legovaných litinách vzniká někdy přímo v litém stavu. Je velmi tvrdý a křehký.

Bainit vzniká jako lící struktura v litinách legovaných zejména molybdenem a niklem nebo po tepelném zpracování. Tyto litiny mají vysokou pevnost a tvrdost a poměrně dobré plastické vlastnosti.

Uhlík patří mezi nekovy a podle toho, v jaké formě se vylučuje, tak přímo ovlivňuje vlastnosti litiny. Základní tvary grafitu v grafitických litinách jsou odvozené podle vzhledu grafitových částic na metalografickém výbrusu, tj. podle vzhledu náhodných rovinných řezů grafitickými částicemi. Je potřeba si uvědomit, že grafit je náhodně rozložený v objemu, a že se jedná o prostorový útvar. Grafitické útvary se mohou vyskytovat v různých formách : lupínkový grafit je charakteristický pro litinu s lupínkovým grafitem, zrnitý(kuličkový) pro litinu s kuličkovým grafitem a červíkový pro litinu s červíkovým grafitem. Grafitové částice oslabují strukturu a porušují kontinuitu základní kovové hmoty. Při namáhání odlitku dochází ke vzniku místních koncentrací napětí v oblasti grafitu, jehož hodnoty mohou podle daného tvaru (10 až 20) krát převýšit jmenovitá napětí. Čím ostrohranější je zakončení útvarů grafitu, tím větší je vrubový účinek. Nejsilnější vrubový účinek má ve struktuře lupínkový grafit , viz schéma na obr. 2-13. Příznivějšími tvary z hlediska porušování celistvosti matrice litin jsou kuličky, viz schéma obr. 2-13, nebo vločky grafitu v temperovaných litinách. Kromě tohoto zmíněného faktu grafit jako takový má velmi malou pevnost. Svou přítomností ve struktuře zmenšuje nosný průřez základní kovové hmoty a tím snižuje pevnost litiny. Nejčastěji se chemické složení litiny s lupínkovým grafitem pohybuje: 2,5 až 3,5 % C, do 3,5 % Si, 0,4 až 0,8 % Mn, 0,2 až 1,2 % P a 0,08 až 0,12 % S. Chemické složení litiny s kuličkovým grafitem bývá obvykle v těchto mezích : 3,2~4,0% C; 1,8~3,0% Si; 0,2~0,8%Mn; max 0,1% P; max 0,05% S; 0,04~0,08%Mg.



Obr. 2-13 Vliv tvaru grafitu na koncentraci napětí

2.2.3 Důvody dodatečného technologického zpracování

Nejčastěji se uplatňuje litina s lupínkovým grafitem v automobilovém průmyslu, např. pro výrobu brzdových bubnů, vložných válců, atd. Litina s lupínkovým grafitem se používá i pro výrobu zdvihátek spalovacích motorů, avšak dosedací plocha zdvihátka je odlévána na chladicí litinovou desku, čímž se získává v povrchové vrstvě zdvihátka potřebná, velmi tvrdá ledeburitická struktura. Ozáření těchto výrobků laserem je jednou z možností, jak získat tvrdou strukturu na dosedací ploše zdvihátka.

Výhody litiny proti jiným materiálům, jsou nízké náklady a výborné technologické vlastnosti jako nízký bod tání, dobrá tekutost a slévateľnost, znamenitá opracovatelnost, odolnost proti opotřebení a dalším dobrým vlastnostem. I přes tyto vlastnosti mohou materiál postihnout tepelné únavové vlastnosti, hlavně v případě častého zahřívání a chlazení pracovní plochy [N.J. Malak, T.J. Mackin, Y. Lejeail,]. Ve srovnání s uhlíkovou ocelí je litina s lupínkovým grafitem křehký materiál s horšími mechanickými vlastnostmi. Z tohoto důvodu stačí k iniciaci trhliny menší tepelné namáhání [W.S. Dai, M. Ma,]. Jako příklad může posloužit časté selhání bubnových brzd z litiny s lupínkovým grafitem u nákladních vozidel. U těchto odlitků dochází k vzniku širokých a hlubokých trhlin, které se nacházejí v celé pracovní ploše bubnu a jejichž délka je přibližně stejně velká jako výška bubnu. Dle analýzy trhlin v bubnech bylo zjištěno, že tyto vedou od tepelně namáhané části brzd až k jejich středu. Při rostoucím tepelném namáhání dojde k jejich propagaci a k roztržení brzdového bubnu [48] Tepelná únavová porucha litiny si vyžádá každým rokem enormní ekonomické ztráty. Zde se nachází velká základna pro možné zlepšování vlastností materiálu proti únavě. Tomuto se výrobci snaží zabránit technologickým postupem, kterému se říká :

2.2.4 Kalení

Tepelné zpracování laserem je použitelné u slitin o obsahu uhlíku větším než 0,3%, které jsou kalitelné i obvyklými kalicími metodami. Oproti klasickým kalicími metodám má zpracování laserem naopak nevýhodu ve vysoké odrazivosti kovů pro vlnové délky $10,6 \cdot 10^{-6}$ m. Pro výkony používané při transformačním zpevnění je koeficient absorpce nižší než 10%. Takovéto zpracování by bylo velmi neefektivní z důvodu ztráty více jak 90% energie. Tento problém se řeší pokrytím povrchu materiálem s vysokým koeficientem absorpce. Vhodné jsou některé typy oxidů Mn – nebo Zn – fosfát a v případě méně náročných aplikací i černá barva. Tenká vrstva materiálu s vysokým koeficientem absorpce je tepelně nezávislá a proto umožňuje dobré ovládání technologických parametrů tepelného zpracování.

Možnost zpevňování měkkých (nizkouhlíkových) ocelí umožňuje jejich záměnu za oceli legované, a tím úsporu drahého konstrukčního materiálu. Při kvalitním provedení tepelného zpracování součástí laserem dochází k prodloužení jejich životnosti o 50 až 400%. Základní matrice litiny by měla být perlitická nebo zušlechtěná s obsahem uhlíku 0,5 až 0,7%. Obsah křemíku, který snižuje rozpustnost uhlíku v austenitu by měl být udržován na nejnižší hodnotě, která ještě zaručuje grafitické tuhnutí, tj. do 2%. Karbidotvorné prvky - Cr, Mo a V zvyšují obsah uhlíku v základní matici a umožňují dosažení vysoké tvrdosti martenzitu.

Množství a forma výskytu grafitu v litinách se významně uplatní rovněž na tepelné vodivosti materiálu, což má pro průběh tepelného zpracování laserem velký význam. Různé typy litin mají odlišné součinitele tepelné vodivosti a při užití stejných parametrů tepelného zpracování laserem je dosaženo rozdílné hloubky vytvrzení.

Po rychlém pohlcení impulsu dostatečně velké energie se nahřátá oblast materiálu rozšiřuje. V případě intenzivních impulsů může dojít až ke vzniku rázových vln. Pohlcené množství energie se s rostoucí vzdáleností od povrchu materiálu mění exponenciálně. Tím dochází ke vzniku velmi strmého teplotního spádu, jež může mít za následek i popraskání materiálu. Souběžně s prohříváním materiálu probíhá i vypařování povrchové vrstvy.

Vzhledem k tepelné roztažnosti materiálu probíhá vypařování pomaleji, což má za následek možný vznik vysokého tlaku par nad ozařovaným povrchem. Toto může být příčinou významného rozrušení materiálu. Proto je hloubka průniku energetického záření jedním z důležitých parametrů pro určení impulsu a rázové vlny.

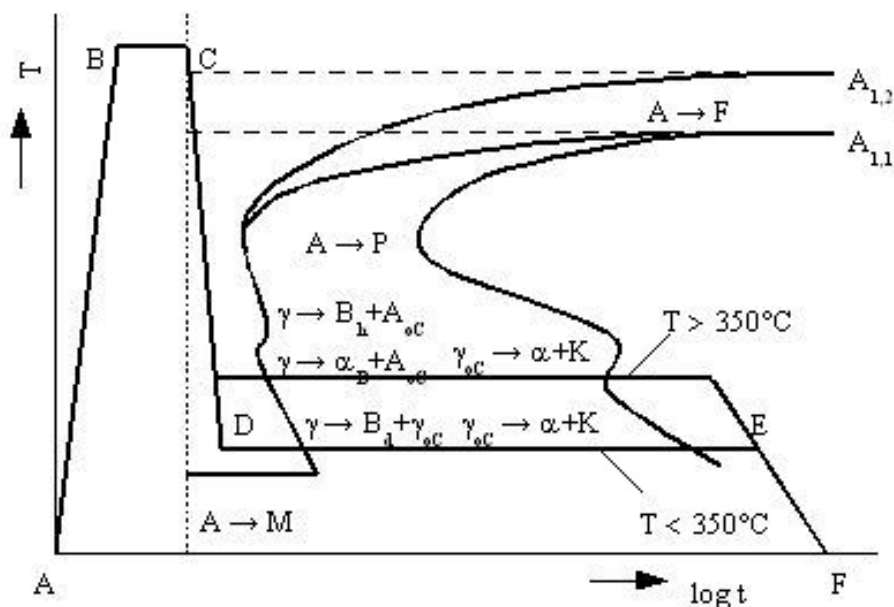
Měření ukázala, že jak hloubka, tak i průměr kráteru rostou se zvýšením energie světelného impulsu, přičemž v intervalu 5 – 7 J kráter prakticky neexistuje. Povrch je pouze pokryt hrubší strukturou s výstupky a vpadlinami v řádech 10^{-5} m. Při zvýšení energie vzniká kónický kráter. Dle měření se kráter při energii paprsku v rozsahu 7,5 – 15 J zvětšuje dvakrát při zachování stejné hloubky. Dalším zvyšováním energie až na 35 J dochází k nárůstu šířky i hloubky útvaru. Tyto hodnoty energie a přetvoření jsou platné pro impulsy o délce 10^{-8} s. Podle zjištění se tohoto stavu dosahuje při impulsech o energii 3 – 5 J a délky 10^{-3} s. Z tohoto je patrný vliv délky impulsu.

Při laserovém kalení povrchových vrstev zakalitelných konstrukčních materiálů se zahřeje funkční plocha laserem ve velmi krátké době na kalící teplotu; kritickou a nebo nadkritickou rychlost chlazení ohřátého objemu kovu obvykle zabezpečí vedení tepla v samotném materiálu a nebo se organizuje externě.

Martenzitické a bainitické kalení

Účelem kalení je získání vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení, používá se především u ocelí. Po něm zpravidla následuje popouštění. Pro zvýšení mechanických vlastností litiny s kuličkovým grafitem se používá bainitické kalení (ADI) neboli izotermické zušlechťování za účelem získání bainitické struktury které zvyšuje pevnost v tahu těchto litin nad 1200 MPa. Odlitky z grafitických litin se kalí z teplot 50 až 80 °C nad kritickou teplotou $A_{1,2}$. Vyšší kalící teplota by měla za následek zvýšení podílu A_f ve struktuře po zakalení, neboť by vlivem vyšší kalící teploty vzrostl obsah uhlíku v austenitu a tím se snížily teploty M_s a M_f jak je znázorněno na obr. 2-14. Prodleva na kalící teplotě závisí významně na výchozí struktuře matrice, se vzrůstajícím podílem feritu se doba austenitizace prodlužuje. Prokalitelnost litin je nízká, neboť křemík zvyšuje, jako hlavní substituční přísada,

prokalitelnost málo. Kalícím prostředím bývá nejčastěji olej. Přítomnost grafitu po zakalení snižuje tvrdost, max. tvrdost litiny s kuličkovým grafitem je asi 700 HV_{0,2}. Jedním z postupů, využívajících tento princip je povrchové kalení. Jeho cílem je zvýšit odolnost odlitku povrchu proti opotřebení. Tloušťka vrstvy bývá podle velikostí průřezu 1,5 mm až několik mm. Povrchovým kalením se podstatně sníží opotřebení např. zubů ozubeného kola za současně lepších kluzných vlastností.



Obr. 2-14 Schéma průběhu teplot při ADI kalení

2.2.5 Princip transformačního zpevnění povrchu slitin železa s uhlíkem

Ozáříme-li laserem požadovanou oblast zpracovávaného materiálu, zvýší se teplota v této oblasti nad eutektoidní teplotu, ale pod bod tání materiálu. Protože neovlivněná oblast má řádově větší objem než oblast ovlivněná, dochází k rychlému odvodu tepla do okolního materiálu. Tímto prudkým ochlazením dojde k vytvoření tvrdé metastabilní transformační struktury martenzitické a ledeburitické.

2.3 Interakce litiny a laseru

2.3.1 Transformační zpevnění litiny

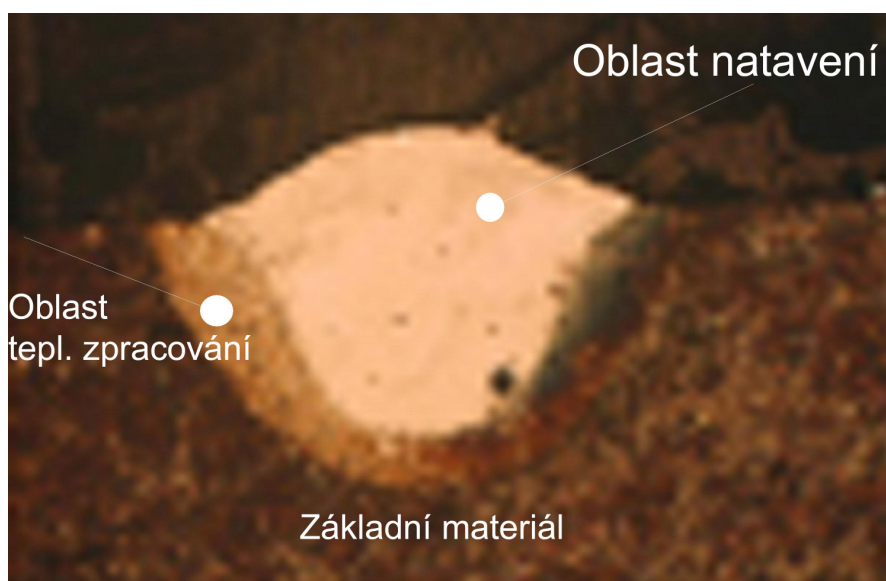
Podle CHENA se může povrchové zpevnění rozdělit do tří skupin:

- a) Transformační pevnění
- b) Zpevnění s povrchovým natavením
- c) Rychlé tuhnutí se vznikem amorfní fáze

Během krátkodobého impulsního ohřevu dochází k austenitizaci základní kovové hmoty litiny nebo může dojít až k jejímu natavení s následující fázovou transformací v důsledku rychlého ochlazení způsobeného intenzivním odvodem tepla do celého objemu materiálu.

V praxi se při tepelném zpracování litin uplatňuje jak transformační zpevnění tak zpevnění s povrchovým natavením. Podle SNĚŽNOJE [36] byly při ozáření pevnofázovým laserem nalezeny v litině s lupínkovým grafitem i amorfní oblasti s mikrotvrdostí dosahující $HV_{0,2} = 1200$. Toto lze však považovat pouze za výjimku.

Při ozáření litiny kontinuálním laserem je struktura tepelně ovlivněné oblasti tvaru „čochy“. Obecně transformovaná oblast se skládá ze dvou zón. Jsou to oblast natavení a oblast tepelného zpracování, která postupně přechází v základní neovlivněný materiál. Schéma ovlivněné oblasti je vidět na obr. 2-15.



Obr. 2-15 Schéma ovlivněné oblasti dle [43] V. Ocelík, U. de Oliveira, J.Th.M. de Hosson

2.3.2 Transformační zpevnění bez natavení

Laserovým transformačním zpevněním bez natavení vzniká pouze oblast tepelného zpracování. Ta je tvořena nejčastěji martenzitickou strukturou s útvary grafitu. Tento jev byl sledován při použití pevnofázového kontinuálního laseru. Toto zpevnění pozorovala celá řada autorů: CHEN, AMENDE, ADRIJACIN, ENGEL.

Nejčastěji se pro ovlivňování litiny laserovým zářením používá kontinuální laser CO₂ s příčným módem TEM₀₁. Rychlost posuvu se pohybuje kolem 0,0166 m.s⁻¹.

Sledování bylo provedeno na různých vzorcích lupínkové litiny s jemným lupínkovým grafitem. Například TRAFFORD [39] použil vzorky rozměrů 150x50x10mm, opatřených antireflexní vrstvou koloidního grafitu.

Chemické složení litiny bylo : 2,9 ~3,2% C; 1,7~2,1% Si; 0,5~0,8 Mn; max 0,1 P a 0,06 S.

Bylo zjištěno, že při použití kontinuálního laseru CO₂ o výkonu 2kW a rychlosti posuvu 0,016m.s⁻¹ není ovlivněná oblast natavená.

Největších hloubek ovlivnění bez natavení je dosahováno čtvercovým průběhem svazku. Pro kratší doby interakce se často používá kruhového průřezu svazku, což ale často vede k natavení povrchu i při použití vyšších rychlostí, jak uvádí ŠÍMAN [38]

2.3.3 Transformační zpevnění s natavením

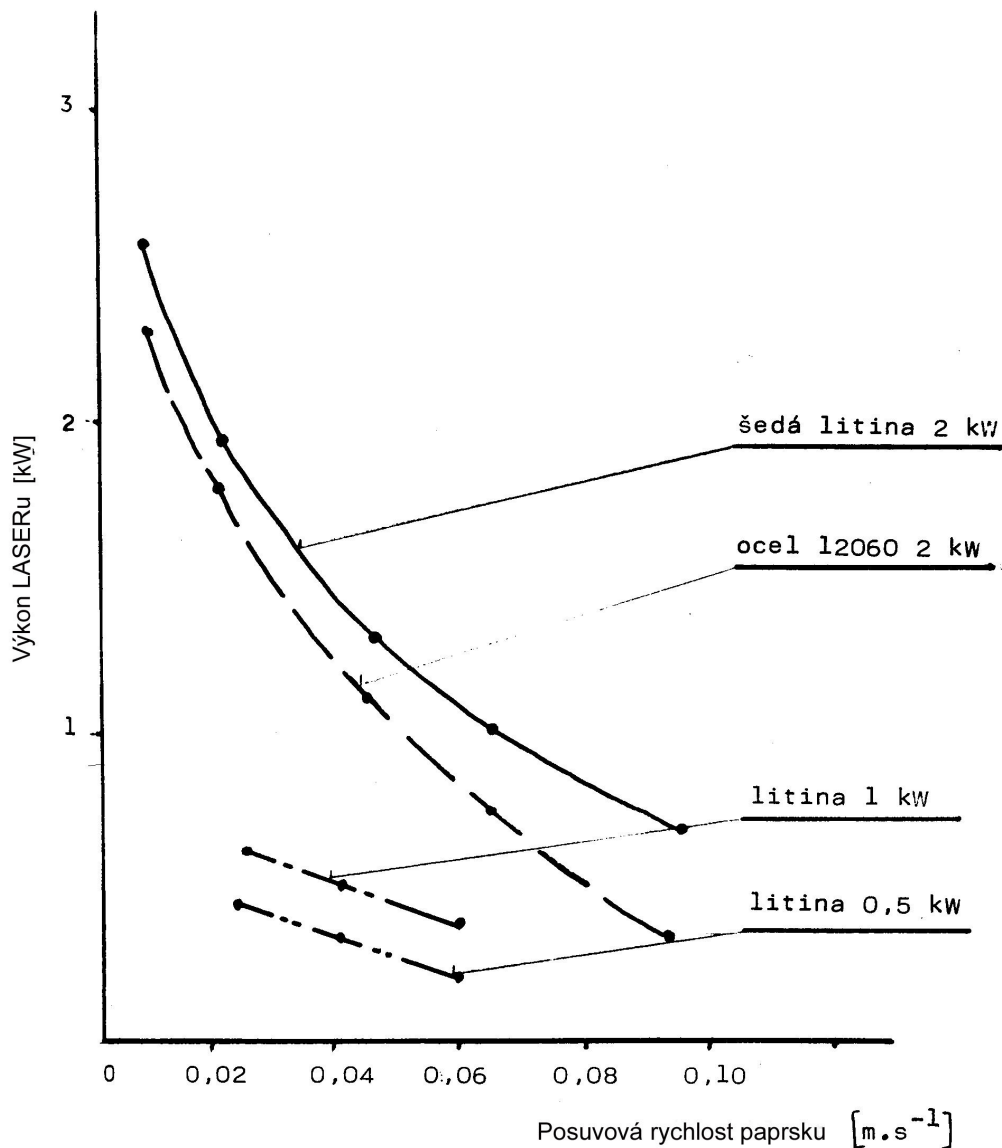
Problematikou transformačního zpevnění litiny s natavením se zabývala řada autorů : CHEN, AMENDE, TRAFFORD, KOKORA. Rozsáhlejší výzkum tohoto technologického postupu byp prováděn ve SVÚM Praha STOLAŘ a kol. na vzorcích litiny s lupínkovým grafitem chemického složení 2,77% C, 0,9% Mn, 2,12 %Si, 0,16 %Cr, 0,08% Ni o rozměrech 100x50x10 mm. Vzorky byly ozářeny kontinuálním laserem CO₂ s módem TEM₀₀ a TEM₀₁. Maximální výkon laseru byl 2,5kW. Byla sledována fokusace paprsku, která byla provedena zrcadlem a KCl čočkou. Tyto pokusy napomohly ke stanovení podmínek při transformačním

zpevnění s natavením. Bylo zjištěno, že při fokusaci zrcadlem nedochází k natavení povrchu litiny při rychlostech nad $0,04 \text{ ms}^{-1}$ a výkonu laseru $2,5 \text{ kW}$.

Na obrázku 2-16 je uvedena závislost hloubky natavení transformační oblasti litiny na rychlosti posuvu a způsobu fokusace.

Při fokusaci čočkou dochází k natavení při všech sledovaných rychlostech posuvu paprsku. Naopak při fokusaci zrcadlem rychlostí posuvu paprsku $0,02$ až $0,4 \text{ ms}^{-1}$ dochází k nespojitému natavení.

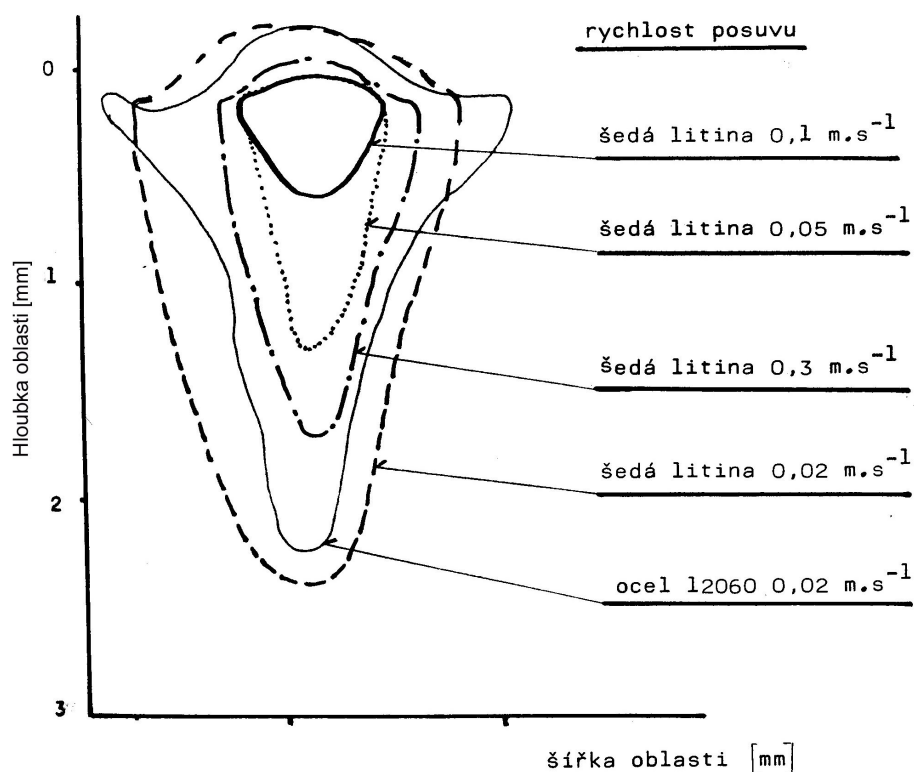
Souvislé natavení materiálu, kdy je tvar natavené oblasti určován zejména teplotní vodivostí, jak uvádí STOLAŘ a kol. [52] závisí na době interakce laserového paprsku s materiálem. S roustoucí interakcí roste hloubka natavené vrstvy, až je úměrná její šířce. Tento způsob natavení je typický pro nízké hodnoty výkonu, které jsou používány při fokusaci zrcadlem. Při fokusaci čočkou nastává souvislé natavení materiálu v důsledku vysokých hustot výkonu až při vysokých rychlostech posuvu laserového paprsku.



Obr 2-16 Závislost hloubky natavené oblasti litiny na rychlosti posuvu a fokusaci, při výkonu zdroje STOLAŘ a kol. [52]

K hlubokému natavení dochází při překročení teploty vypařování, kdy vzniká pára kovu. Tím má paprsek možnost hlouběji proniknout do materiálu. Tak dochází k prohlubování ovlivněné oblasti, která získává tvar U nebo V.

Srovnání tvarů natavených oblastí, jak uvádí STOLAŘ a kol. je patrné, že litina má větší hloubku natavených oblastí než ocel s 0,6% a 0,2% C, v důsledku její nižší teploty tání. Na schématu 2-17 jsou uvedeny tvary natavených oblastí litiny.



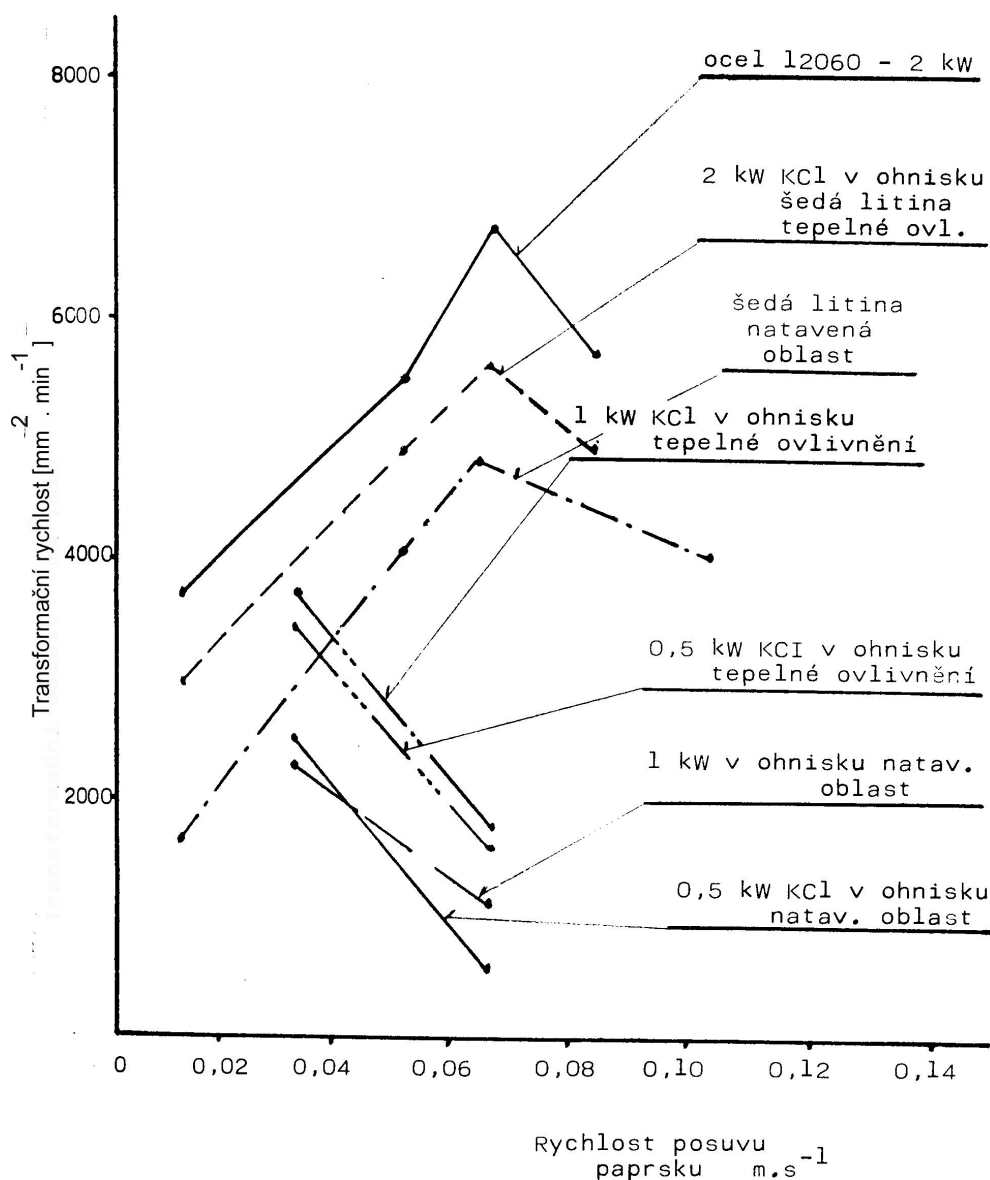
Obr. 2-17 Tvary natavených oblastí litiny STOLAR a kol. [52]

V této souvislosti byla také sledována rychlostní závislost součinu rychlosti posuvu a šířky transformačně natavené oblasti vzniklé za jednotku času.

Tyto výzkumy ukázaly, že při nižších rychlostech posuvu paprsku dochází ke ztrátám tepla vedením materiálu a při vysokých rychlostech nedojde k natavení základního materiálu.

Na obr. 2-18 je uvedena závislost plochy povrchu natavené a transformační oblasti.

V souvislosti se sledovanou problematikou natavení povrchové vrstvy materiálu byl sledován i vznik povrchových vad a reliéfů. To souvisí s menší rychlostí posuvu laserového paprku, kdy dojde k natavení do větší hloubky, přičemž dochází ke stahování tuhnutí taveniny vlivem povrchového napětí. Tento jev lze ovlivnit snížením povrchového napětí např. zvýšením obsahem síry, jak uvádí KOKORA. K povrchovému natavení jsou vhodné nelegované litiny s dostatečným obsahem uhlíku pro vznik přesycení fází železa a pro precipitaci karbidů mezi dendrity BERGMANN [2] Roztavená zóna tuhne s dendritickou strukturou a dendrity jsou orientovány ve směru nejvyššího odvodu tepla.



Obr. 2-18 Závislost plochy povrchu natavené a transf. oblasti

Jak je patrné z dosažených výsledků, při využití transformačního zpevnění litin s natavením je nutné použít nižší hustoty výkonu.

Strukturu litiny s lupínkovým grafitem po transformačním zpevnění s natavením zkoumalo více autorů, např. TRAFFORD a kol. [39] uvádí, že při natavení litiny s perlitickou strukturou a jejím následném ochlazení se v povrchové vrstvě objevuje ledeburit. Přejímová vrstva je tvořena hrubými martenziovými deskami a zbytkem austenitu. Podle CHENA [32] zpevňováním a povrchovým natavením vzniká nejčastěji smíšená struktura martenzitu, zbytkového austenitu a cementitu. AMENDE [1] podporuje také názor, že při vyšších hustotách výkonu dochází

k natavení povrchu a následným ochlazením vzniká ledeburitická struktura, jež podporuje vznik trhlin.

2.3.4 Fázové přeměny ohřevu litiny laserem

Základem fázových přeměn litiny při rychloohřevu laserem se zabývalo méně autorů. Podle SEAMANA a ENGELA [37,31] fázové přeměny litiny, které jsou základem jejího transformačního zpevnění probíhají v zásadě dvěma způsoby:

- a) Austenitizací perlitu během rychlého ohřevu a přeměnou austenitu na martenzit během následujícího rychlého ochlazení.
- b) Difuzí uhlíku z grafitu do okolního feritu nebo perlitu a přeměnou takto uhlíkem obohaceného okolí grafitických částic na austenit během rychlého ohřevu a též po jeho následném rychlém ochlazení vzniká martenzit.

2.3.5 Austenitizace litiny

Austenitizací grafitických litin se proti austenitizaci ocelí zabývalo málo autorů např. BUNIN, JAKOVLEV [30,33], kteří zkoumal kinetické diagramy u grafitických litin při rychlém ohřevu 500 Ks^{-1} . Došli k názoru, že kritické teploty začátku a konce austenitizace závisí na chemickém složení litiny, především na obsahu křemíku. S rostoucím obsahem křemíku vzrůstá počáteční a konečná teplota austenitizace. Také eutektoidní přeměna grafitických litin je závislá na chemickém složení a rychlosti ohřevu.

První zárodky austenitu se při austenitizaci litiny objevují na hranici CEMENTIT – FERIT v perlitické základní kovové hmotě. Ferit v perlitu obsahuje méně křemíku než volný ferit. Přemísťování hranice AUSTENIT – FERIT na stranu feritu závisí na koncentraci křemíku ve feritu. Po proběhlé nukleaci austenitu přednostně v okolí grafitu se litina stává v podstatě čtyřfázovým systémem: FERIT – AUSTENIT – CEMENTIT – GRAFIT. Pokud je litina tvořena feritickou kovovou hmotou, pak se stává systémem trojfázovým: FERIT – AUSTENIT – GRAFIT.

Kolem částic cementitu se šíří vrstva austenitu směrem do cementitu účinkem difúze, která převádí uhlík k fázovému rozhraní s feritem a odvádí jej od hranice

s cementitem. Fázové rozhraní AUSTENIT – FERIT se tedy posunuje do feritu a rozhraní AUSTENIT – CEMENTIT ve směru do cementitu, tzn. ferit a cementit jsou pohlcovány austenitem až do jejich úplného vymizení, po nichž ještě po určitou dobu zachovává nehomogenní rozdělení uhlíku v austenitu.

Rychlost růstu austenitické částice, která koresponduje s rychlostí posuvu fázových rozhraní F – A a C – A do feritu nebo cementitu je dána přibližnou rovnicí (2.2):

$$v = D \cdot \frac{dc}{dx} \cdot \left(\frac{1}{C_{af}} + \frac{1}{C_{ca}} \right), \quad (2.2)$$

kde značí : v - rychlost posuvu fázového rozhraní

D – difuzní koeficient pro uhlík v austenitu

C_{af} , C_{ca} – rozdíly koncentrací na příslušných místech

$\frac{dc}{dx}$ - koncentrační gradient.

Koncentrační gradient je úměrný rozdílu mezních koncentrací uhlíku v austenitu a nepřímo úměrný difúzní dráze. Rychlost růstu austenitu vzrůstá i růstem teploty, protože s teplotou roste i difuzní koeficient D a snižuje se rozdíl mezních koncentrací na fázové rozhraní AUSTENIT – FERIT a CEMENTIT – AUSTENIT.

2.3.6 Difuze uhlíku z grafitu

Chování grafitu při austenitizaci litiny při ozáření laserem je spojeno s difuzí uhlíku do okolního feritu nebo perlitu z okolí obohaceného uhlíkem a také přispívá ke vzniku austenitu.

Podle JAKOVLEVA [33] se austenit přednostně objevuje na hranici FERIT – GRAFIT. Autor tento jev vysvětluje tím, že grafit se při vysokých rychlostech ohřevu částečně rozpouští a je intenzivním zdrojem uhlíku pro vznikající austenit. Pokud dochází vlivem interakce laserového záření s litinou až k jejímu natavení, tak uhlík z grafitu se oxiduje a vypařuje z taveniny, avšak tyto děje jsou velmi složitě provázány. Rozložení koncentrace v závislosti na čase a prostoru uvádí JOST podle vztahu(2.3):

$$C = \left(\frac{S}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \right) \left(-\frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t} \right) \quad (2.3)$$

Kde značí : C – značí koncentraci uhlíku

D – difuzní koeficient

t – čas difuze

x – difuzní vzdálenost

Pro integrál plochy S lze psát:

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} c dx \quad (2.4)$$

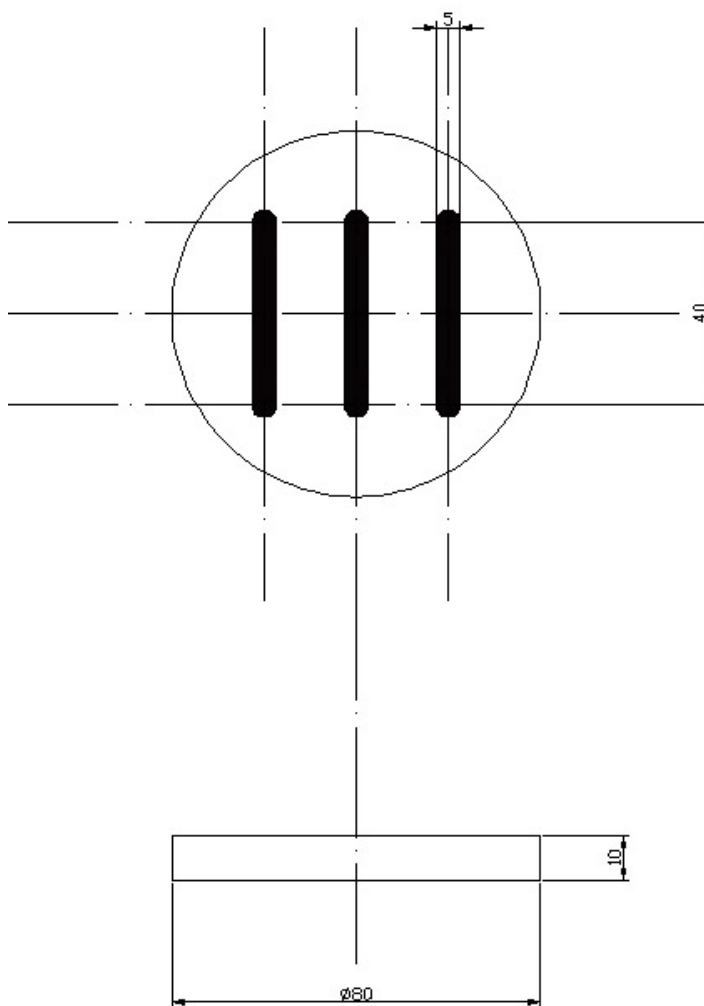
Difuze uhlíku je výrazně ovlivňována i strukturou základní kovové hmoty litiny; mřížkové poruchy na povrchu krystalů a na hranicích zrn jsou vhodné pro difuzi, neboť se snadno vytváří difuzní kanály. Při vysokých teplotách se atomy pohybují dostatečně rychle v celém objemu materiálu, tj. i v oblasti s malým počtem strukturních poruch.

3. Experimentální část práce

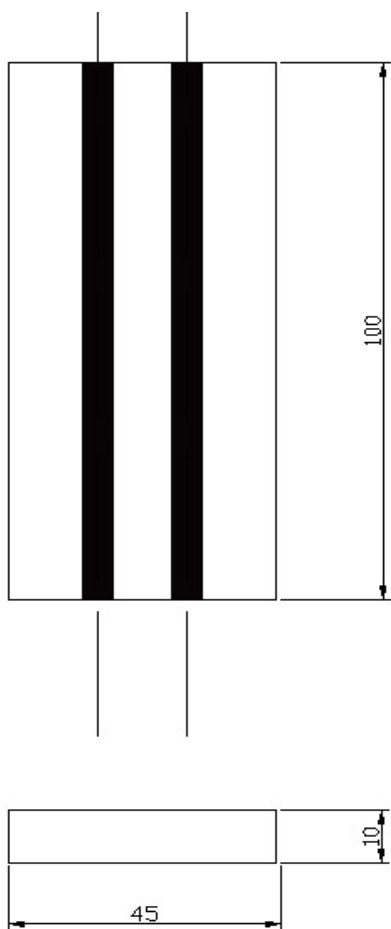
Experimentální část této práce je zaměřena na sledování stop po ozáření vzorků z litiny s lupínkovým, červíkovým a kuličkovým grafitem kontinuálním laserem o výkonu 2,0 kW firmy Control Laser se smíšeným módem TEM_{00} a TEM_{01} .

3.1 Příprava vzorků pro metalografické pozorování

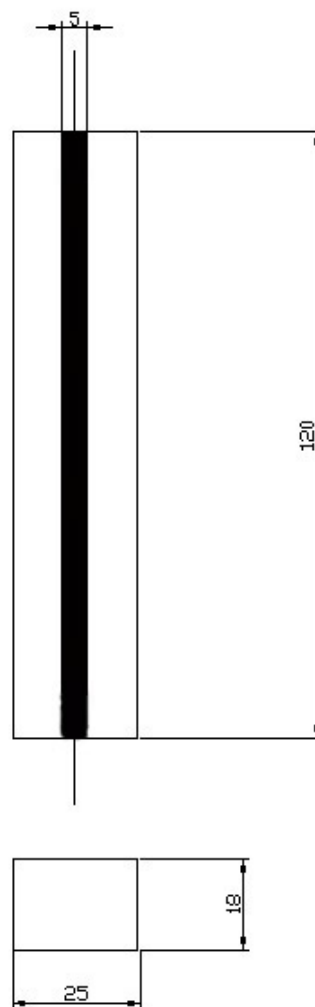
Vzorky byly k pozorování mikroskopem připraveny běžně používaným postupem k pozorování na světelném mikroskopu. Rozměry polotovarů, ze kterých byly vzorky získány jsou uvedeny na schématech 3 -1, 3-2, 3-3. Vzorky byly rozřezány ruční pilou, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku např. při mechanickém rozbrušování. Očištěné vzorky byly zality do dentakrylu. Pro zvýraznění struktury bylo použito leptadla NITAL 3%. Pozorování a fotografování struktury bylo provedeno na mikroskopu Carl Zeiss Jena Neophot 21, při použití 100x, 500x a 1000x zvětšení. Bylo použito pozorování ve světlém poli.



Obr. 3-1 Schéma vzorků z LLG pro ozáření laserem



Obr. 3-2 Schéma vzorku
z LČG prozáření laserem



Obr. 3 – 3 Schéma vzorku
z LKG prozáření laserem.

3.2 Hodnocení výchozího stavu litiny

3.2.1. Hodnocení výchozího stavu litiny s lupínkovým grafitem

Pro laserové záření byla použita litina s lupínkovým grafitem s mezním obsahem prvků uvedeným v tabulce 3-1.

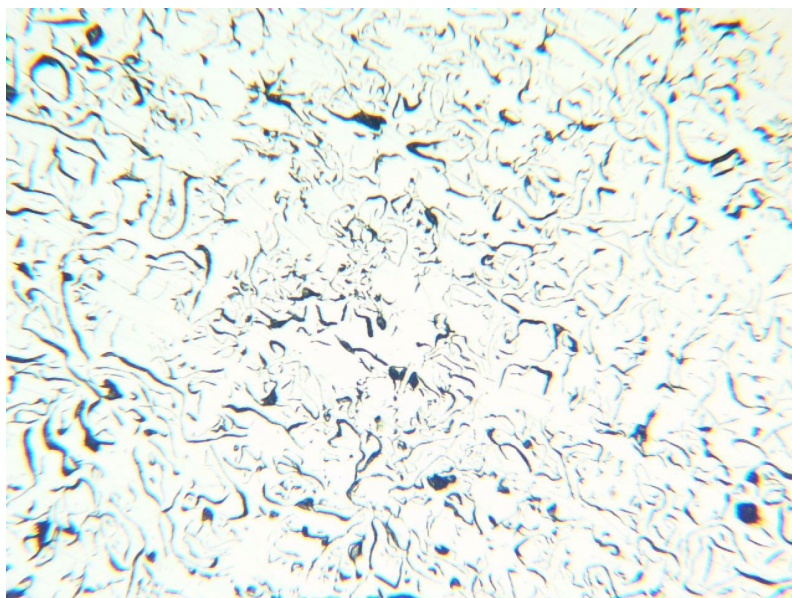
Tabulka 3 – 1 Chemické složení litiny LLG

Prvek	Obsah prvků [%]				
	C	Si	Mn	P	S
	3,5~3,8	3,0	0,7	0,25	0,08
Prvek	Ni	Cu	Sn	Sb	
	0,1	0,2	0,03	0,03	

Vzorky pro laserové záření byly vyrobeny kontinuálním litím. Struktura výchozího stavu litiny s lupínkovým grafitem byla vyhodnocena na optickém mikroskopu při 100 násobném zvětšení.

Hodnocení grafitu bylo provedeno dle etalonové řady uvedené v normě ČSN 420461. Grafit ve všech sledovaných vzorcích litiny s lupínkovým grafitem vykazoval stejný tvar, velikost i rozložení. Tvar grafitu může být označen jako lupínkový, rozložení smíšené o velikosti od 60 do 120 μm ; označení dle normy I C 5. Strukturní fáze a součásti byly také hodnoceny dle normy ČSN a jejích etalonových řad. Z rozboru vyplynulo, že základní kovová matrice litiny s lupínkovým grafitem je perlitická. Tvar perlitu je lamelární a odpovídá etalonovému hodnocení P1 a jeho obsah v matrici je nad 98%, obsah feritu je do 2%; označení P – FeO. Průměrná vzdálenost lamel cementitu je v rozmezí 0,3 – 0,8 μm .

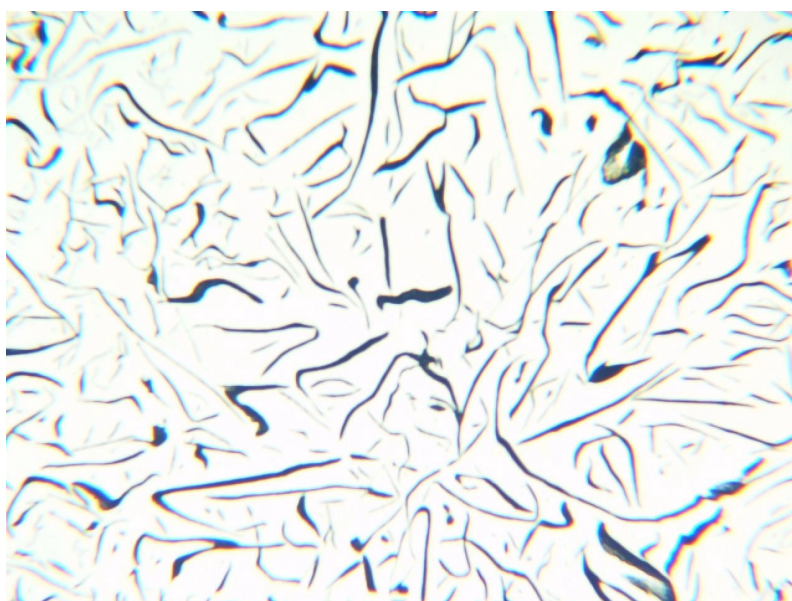
Obsah eutektického cementitu je od 0 do 2% a je hodnocen dle etalonové řady jako C₂. Hodnocená struktura litiny s lupínkovým grafitem je na obrázku 3-4a,b,c.



Neleptáno

100x

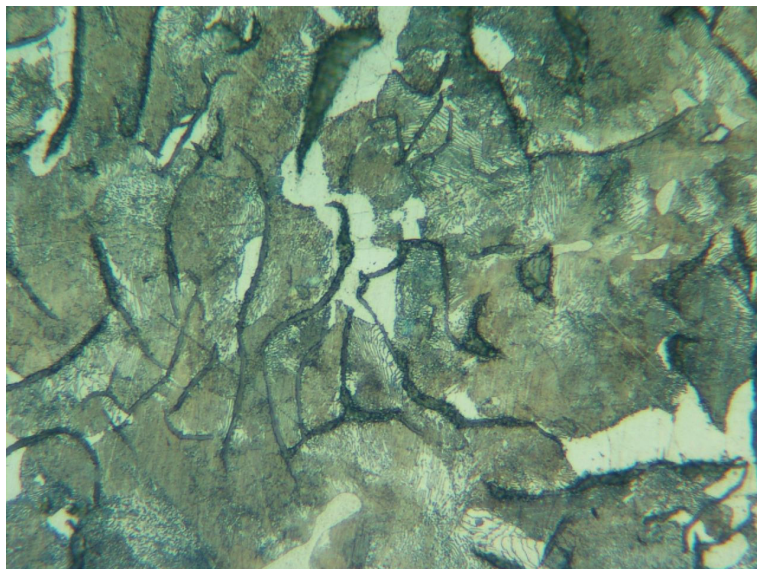
Obr.3-2a Rozložení , velikost a tvar grafitu v litině s lupínkovým grafitem ve výchozím stavu



Neleptáno

250x

Obr.3-2b Mikrostruktura litiny s lupínkovým grafitem



NITAL 3%

500x

Obr. 3-2c Mikrostruktura litiny s lupínkovým grafitem
(výchozí stav)

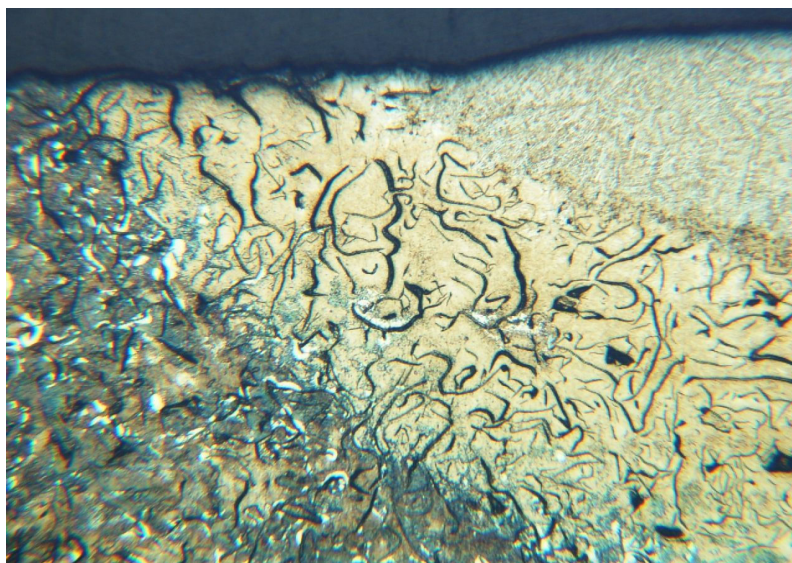
3.2.1.1 Vyhodnocení vzorků z litiny s lupínkovým grafitem po ozáření laserem

Vzorek č.1

Rychlost posuvu laserového paprsku	.....	0,01 m.s ⁻¹
Výkon laserového paprsku	.....	2 kW
Max. hloubka stopy	.....	1,3 mm
Max. šířka stopy	.....	5 mm

Při pozorování vzorku č.1 z litiny s lupínkovým grafitem byla zjištěna strukturně ovlivněná oblast čoučkovitého tvaru. Tato oblast se skládá ze dvou výrazných pásem jak ukazuje obrázek 3-3. Hloubka ovlivněné oblasti je 1,3 mm a šířka 5mm. Oblast natavení je tvořena dendritickou strukturou metastabilního eutektika, kde jsou dendrity převážně natočeny ve směru největšího gradientu teploty jak je vidět na obrázcích 3-4a,b. V této oblasti nejsou žádné grafitové vyloučeniny. Maximální hloubka je 0,4 mm.

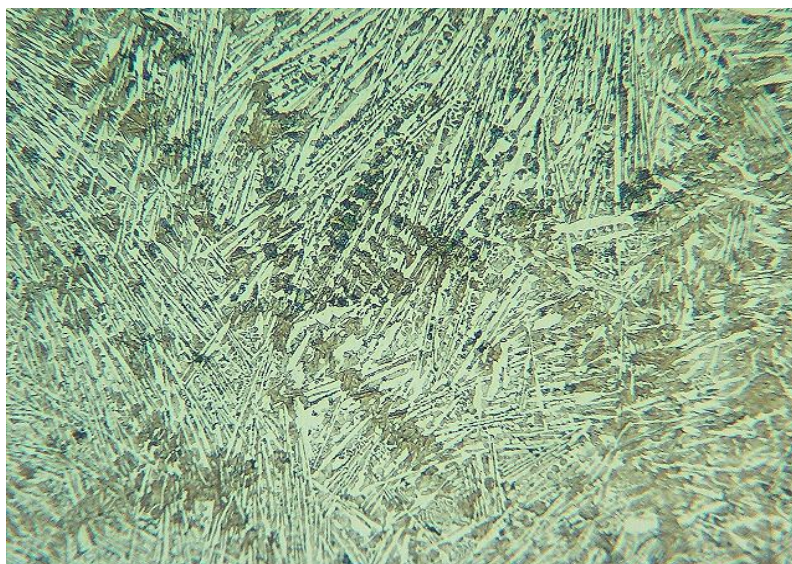
Druhá oblast tepelného zpracování je tvořena martenzitickou strukturou s přítomností lupínků grafitu. Tato oblast pozvolně přechází v základní materiál perlitické litiny s tepelně neovlivněným lupínkovým grafitem.



NITAL 3%

100x

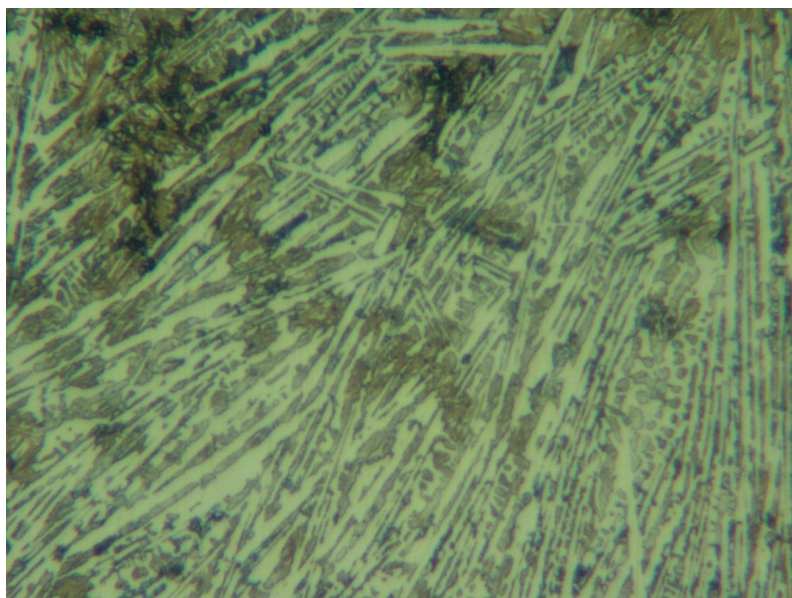
Obr. 3-3 Mikrostruktura litiny s lupínkovým grafitem, přechod z natavené oblasti do základního materiálu



NITAL 3%

500x

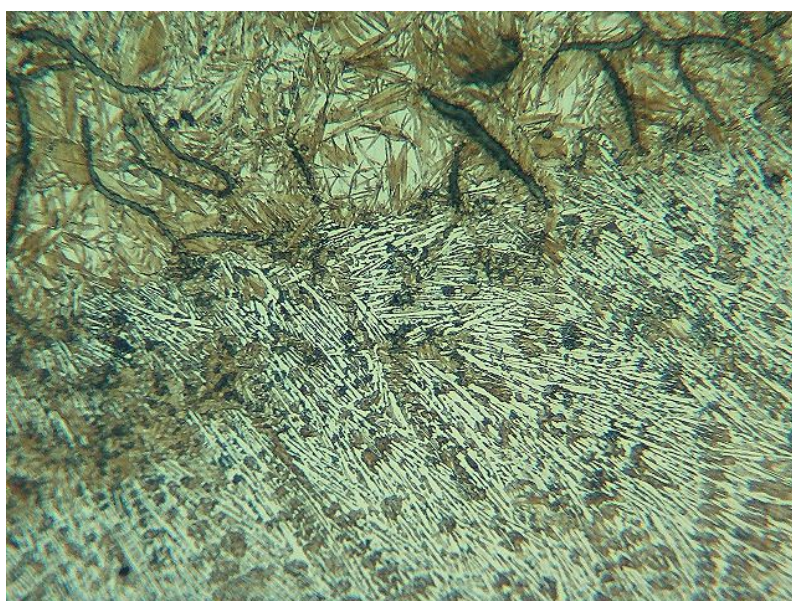
Obr. 3-4b Tepelně ovlivněná oblast čočky s ledeburitickou strukturou



NITAL 3%

1000x

Obr. 3-4b Struktura tepelně ovlivněné oblasti
s natavením



NITAL 3%

500x

Obr. 3-5 Přejímová oblast čočky

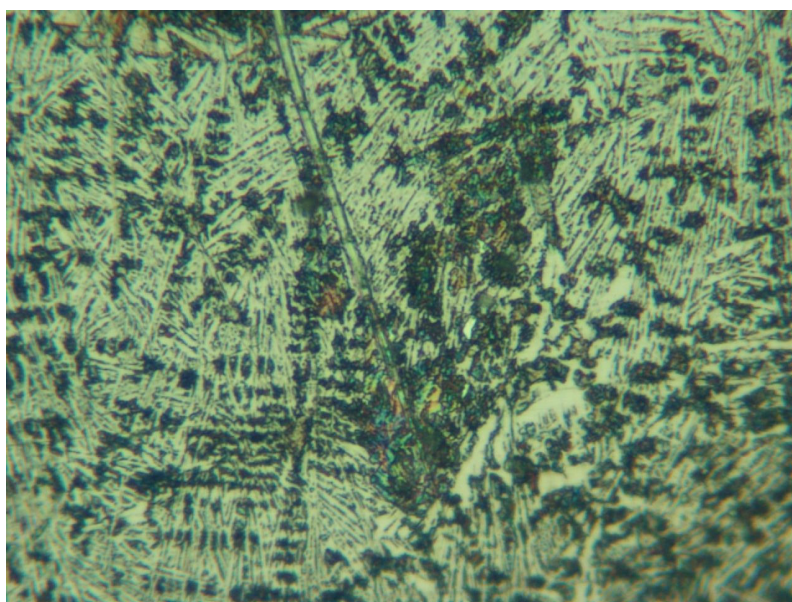
Vzorek č.2

Rychlost posuvu laserového paprsku	.....	0,013 m.s ⁻¹
Výkon laserového paprsku	.....	2 kW
Max. hloubka stopy	.....	0,9 mm
Max. šířka stopy	.....	4,8 mm

Při rychlosti posuvu 0,013 m.s⁻¹ jsou zřetelné dvě výrazné zóny čočkovitého tvaru. Zóna natavení dosahující hloubky 0,3 mm a zóna tepelného zpracování. Celková hloubka obou oblastí je 0,9 mm.

V oblasti natavení je vidět(obr. 3-6) typickou strukturu metastabilního eutektika bez výraznějšího směrového uspořádání.

Oblast tepelného zpracování je tvořena martenzitickou strukturou, viz obr. 3-7a,b. S rostoucí vzdáleností od středu čočky se zvětšuje přítomnost lupínků grafitu v martenzitu jak ukazuje obr. 3-8. Tato oblast postupně přechází do základní tepelně neovlivněné kovové hmoty lupínkové litiny.



NITAL 3%

1000x

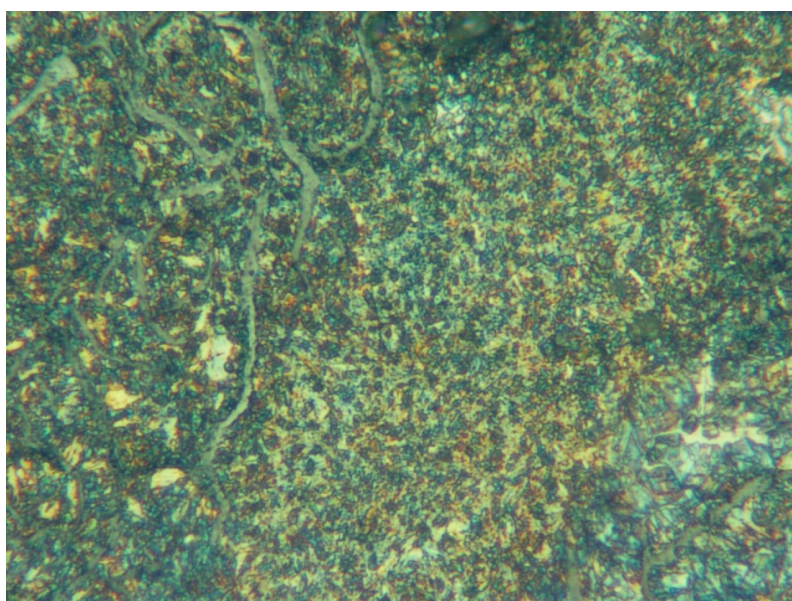
Obr. 3-6 Oblast natavení materiálu



NITAL 3%

500x

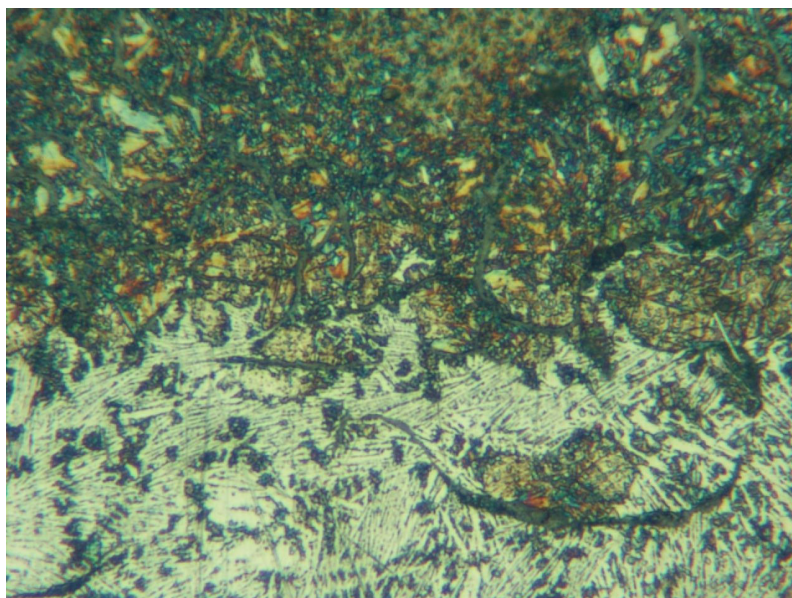
Obr. 3-7a Tepelně ovlivněná oblast materiálu



NITAL 3%

1000x

Obr. 3-7b Martenzitická struktura tepelně ovlivněné oblasti materiálu



NITAL 3%

1000x

Obr. 3-8 Přechod oblasti tepelně ovlivněné do základního materiálu

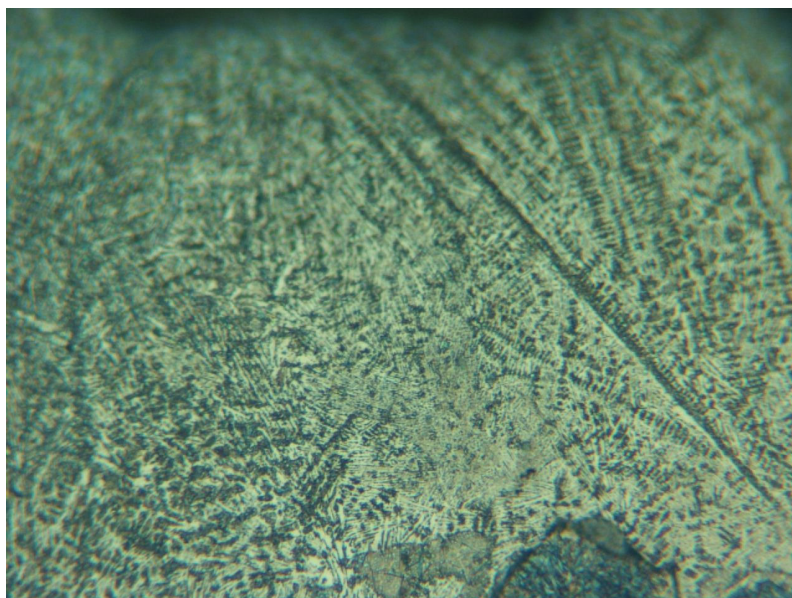
Vzorek č.3

Rychlost posuvu laserového paprsku	.....	0,015 m.s ⁻¹
Výkon laserového paprsku	.....	2 kW
Max. hloubka stopy	.....	1 mm
Max. šířka stopy	.....	4,9 mm

Pozorováním vzorku ovlivněného laserem o výkonu 2kW při rychlosti 0,015 m.s⁻¹ byla zjištěna oblast čočkovitého tvaru skládající se ze dvou pásem. Hloubka celé čočkovité oblasti je 1 mm a šířka dosahuje 4,9 mm.

Oblast natavení je tvořena dendritickou strukturou bez výrazného uspořádání jak je vidět na obrázku 3-9a,b. Struktura této oblasti má typickou strukturu metastabilního eutektika bez vyloučeného grafitu. Maximální hloubka této oblasti je 0,4 mm.

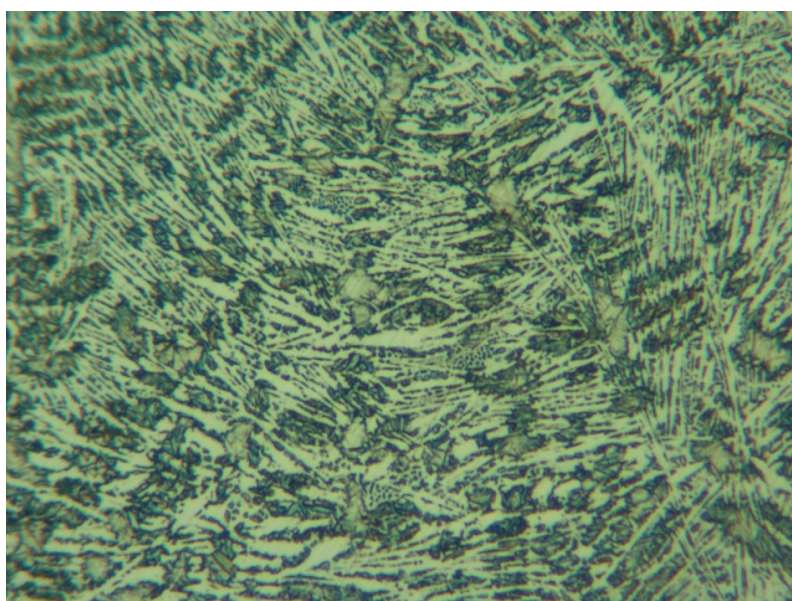
Oblast tepelného zpracování je tvořena martenzitickou strukturou s přítomností grafitových lupínků pozvolna přecházející do základní kovové hmoty perlitické litiny s nezměněnými lupínky grafitu.



NITAL 3%

500x

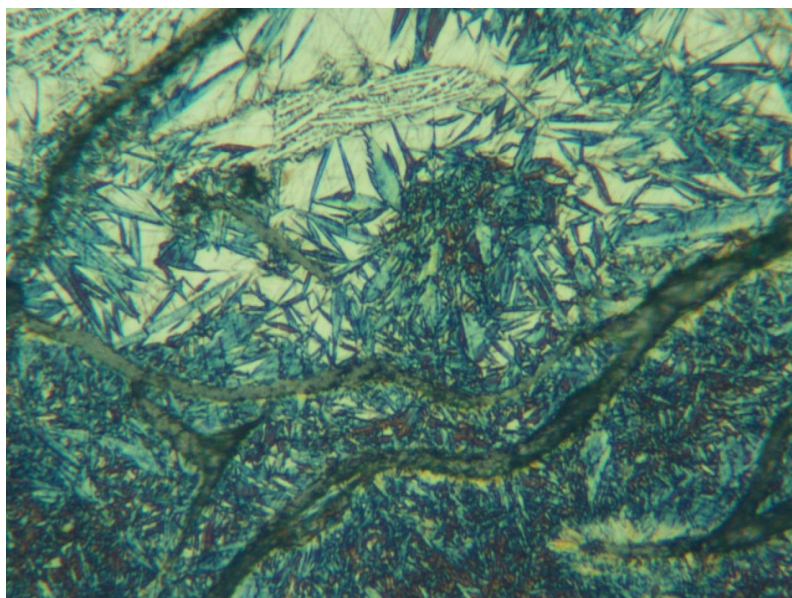
Obr.3-9a Oblast natavení materiálu



NITAL 3%

1000x

Obr. 3-9b Oblast natavení materiálu v čočce



NITAL 3%

1000x

Obr.3-10 Přejíhová oblast tepelného ovlivnění materiálu

3.2.2 Hodnocení výchozího stavu litiny s červíkovým grafitem

Pro laserové záření byla použita litina s červíkovým grafitem s mezním obsahem prvků uvedená v tabulce 3-2.

Tabulka 3 -2 Přehled obsahu prvků v LČG

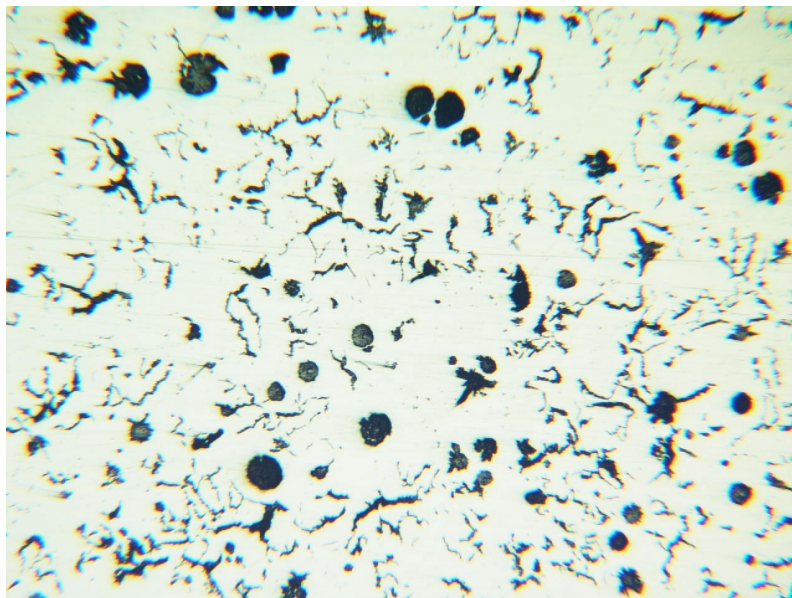
	Obsah prvků [%]				
Prvek	C	Si	Mn	P	S
	3,7~4,0	1,9	0,5	0,07	0,025

Vzorky pro zpracování laserem vznikly kontinuálním litím. Hodnocení mikrostruktury výchozího stavu litiny s červíkovým grafitem bylo provedeno na optickém mikroskopu se 100 násobným zvětšením.

Hodnocení bylo provedeno dle etalonové řady uvedené v normě ČSN 420461. Struktura vzorku litiny s červíkovým grafitem obsahuje asi 65 % nedokonale zrnitého grafitu. Rozložení grafitu ve vzorku je rovnoměrné. Velikost částic grafitu

je v mezích od 30 do 60 μm ; označení dle normy V A6. Dalším zkoumáním vzorků byla zjištěna základní kovová matrice jako feriticko-perlitická. Tvar perlitu je lamelární a odpovídá označení dle etalonu P1. Ve vzorcích je asi 80% perlitu a feritu asi 20%. Obsah eutektického cementitu je do 2%, dle etalonu je jeho označení C 2.

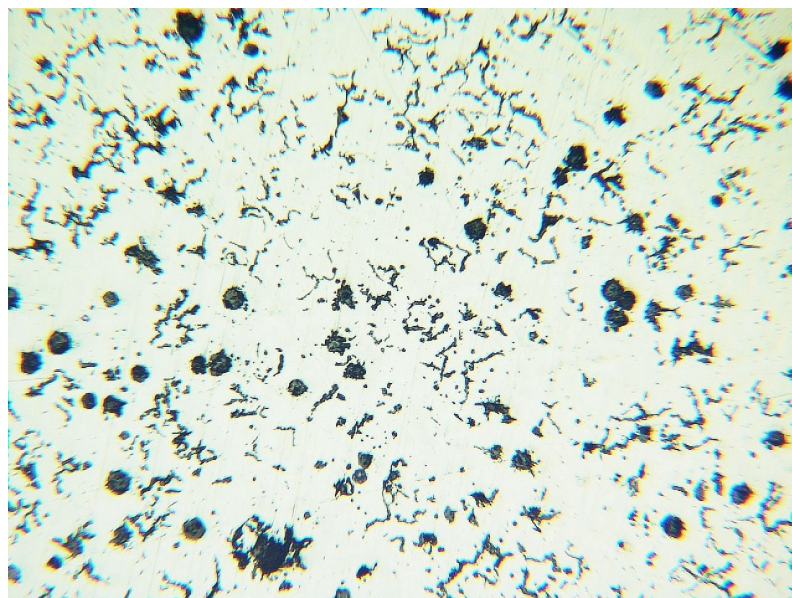
Hodnocená struktura je na obrázku 3-11a,b.



Neleptáno

100x

Obr. 3-11a Mikrostruktura litiny s červíkovým grafitem
základní oblasti materiálu



Neleptáno

100x

Obr. 3-11b Rozložení a tvar grafitu v litině s červíkovým
grafitem

3.2.2.1 Vyhodnocení vzorků z litiny s červíkovým grafitem po ozáření laserem

Vzorek č.1

Rychlost posuvu laserového paprsku	.....	0,0066 m.s ⁻¹
Výkon laserového paprsku	.....	2 kW
Max. hloubka stopy	.....	1,05 mm
Max. šířka stopy	.....	5,1 mm

Při sledování vzorku č.1 z litiny s červíkovým grafitem byla opět zjištěna strukturně ovlivněná oblast čočkovitého tvaru. Tato oblast se skládá ze dvou výrazných pásů jak ukazuje obrázek 3-3. Hloubka ovlivněné oblasti je 1,3 mm a šířka 5mm. Oblast natavení je velká 0,45 mm. V oblasti natavení byla zjištěna ledeburitická struktura, viz obr.3-12, s malým množstvím vyloučeného nedokonale globulárního grafitu. Dendritickou strukturu metastabilního eutektika tvoří dendrity natočené převážně ve směru největšího odvodu tepla.

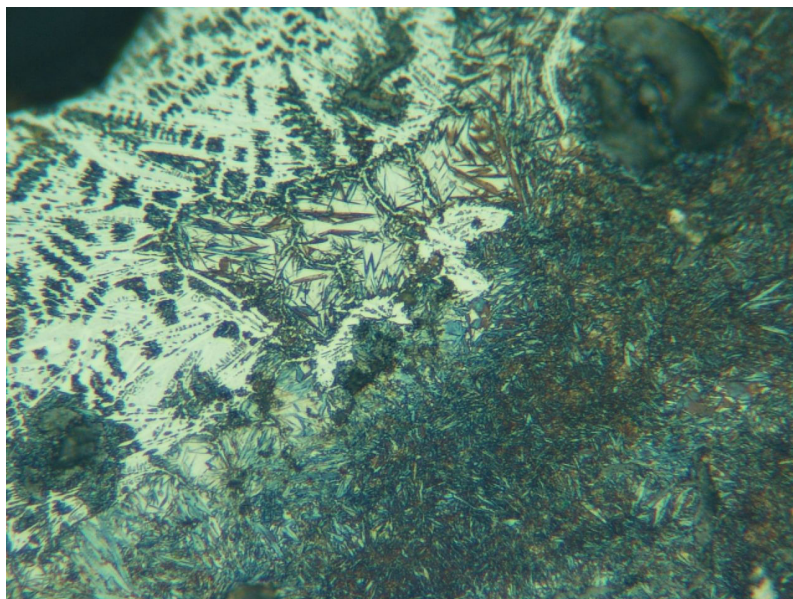
Oblast tepelného zpracování má rozměr 0,60 mm a je tvořena martenzitickou strukturou (obr. 3-13), která obklopuje ledeburit v oblasti natavení. Tento přechází do základního materiálu, viz obr 3-14.



NITAL 3%

500x

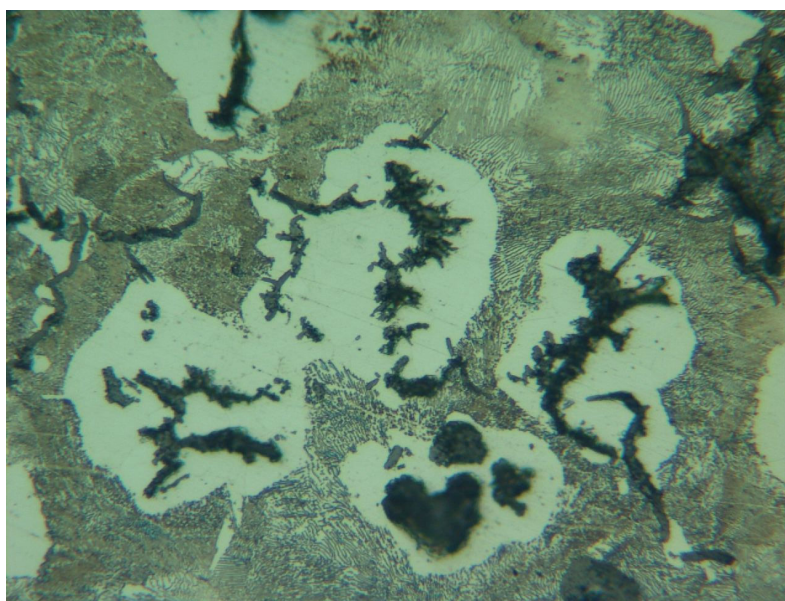
Obr. 3-12 Struktura ledeburitu v natavené oblasti



NITAL 3%

500x

Obr. 3-13 Přechod martenzitické struktury tepelně ovlivněné oblasti do základního materiálu



NITAL 3%

500x

Obr. 3-14 Základní kovová hmota litiny s červíkovým grafitem

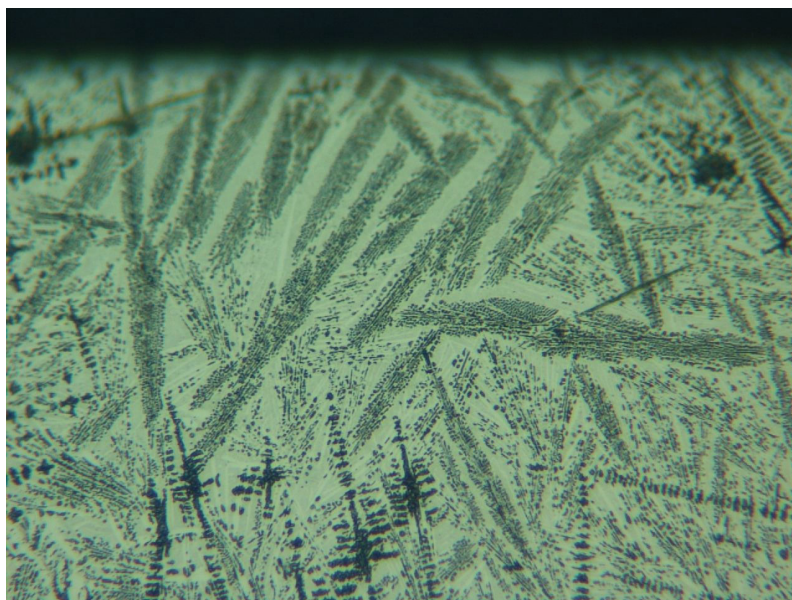
Vzorek č.2

Rychlost posuvu laserového paprsku	0,01 m.s ⁻¹
Výkon laserového paprsku	2 kW
Max. hloubka stopy	0,84 mm
Max. šířka stopy	4,9 mm

Analýzou vzorku č.2 byla zjištěna tepelně ovlivněná oblast tvaru kruhové úseče. Úseč je tvořena dvěma viditelnými oblastmi. Oblast natavení je má rozměr 0,36mm a oblast tepelného zpracování 0,48 mm.

Oblast natavení tvoří ledeburitická struktura(obr.3-15a,b) s nedokonale rozpuštěným globulárním grafitem. Dendritická struktura je z většiny orientována ve směru teplotního gradientu.

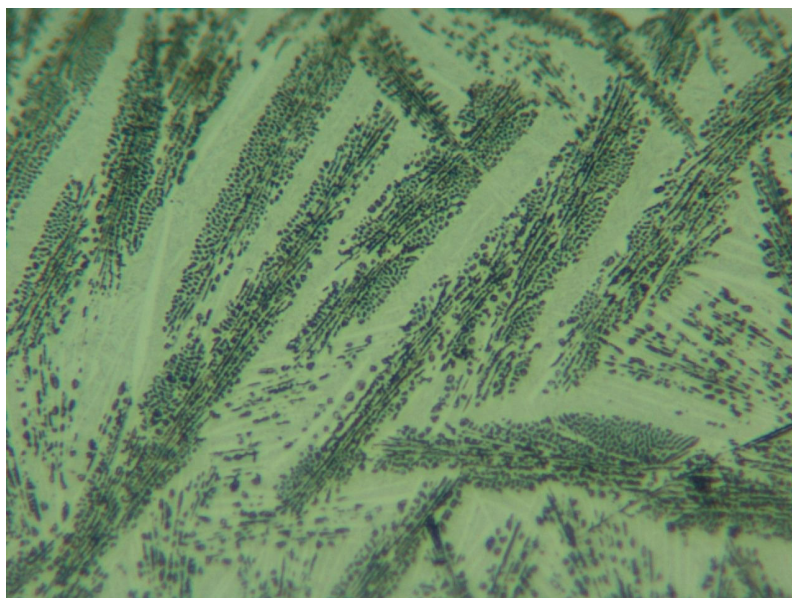
Oblast tepelného zpracování je tvořena převážně martenzitickou strukturou, která obklopuje ledeburit v oblasti natavení. Martenzit(obr.3-16) má s klesajícím teplotním gradientem jehlice drobnější morfologie až do oblasti materiálu neovlivněné laserem(obr 3-17a,b).



NITAL 3%

500x

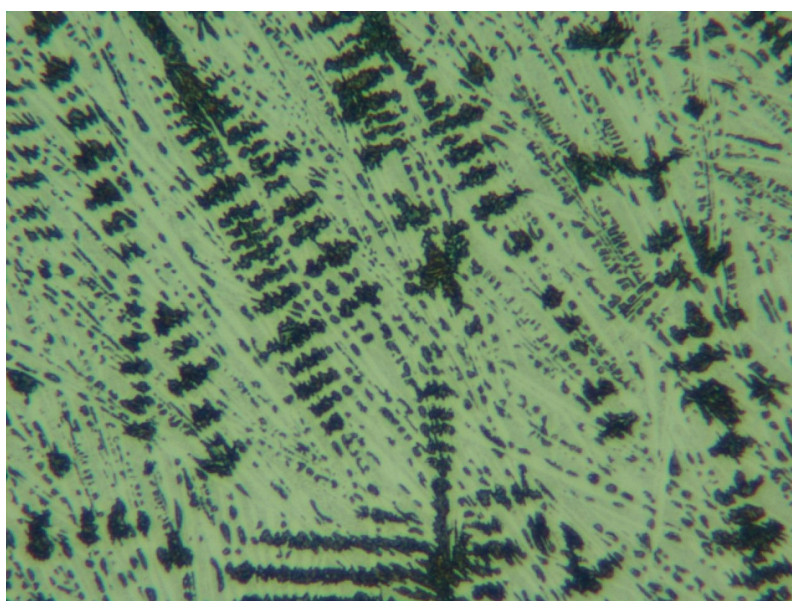
Obr. 3-15a ledeburitická struktura čočky



NITAL 3%

1000x

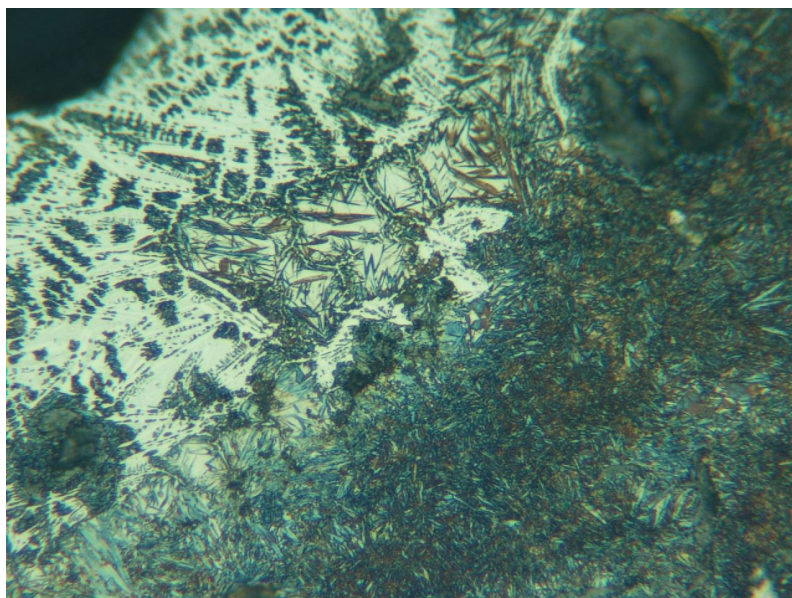
Obr.3-15b Ledeburit v oblasti natavení



NITAL 3%

1000x

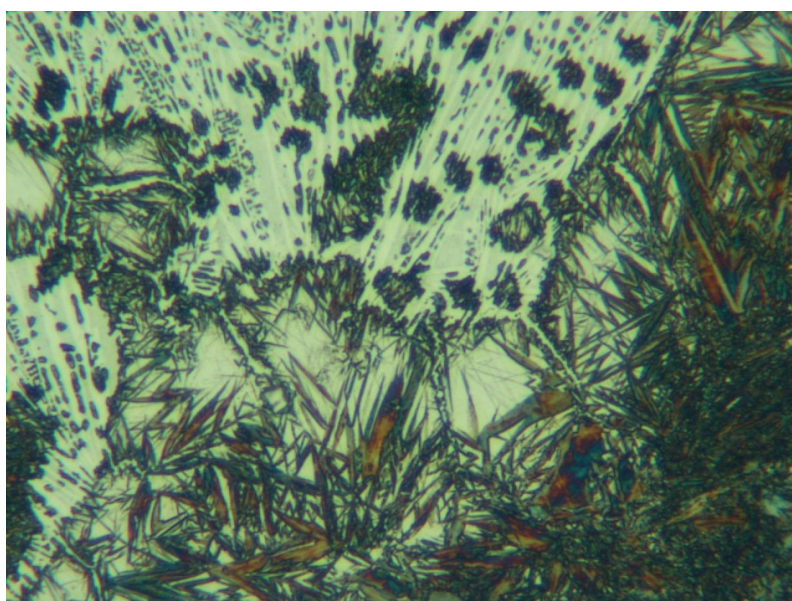
Obr. 3-16 Martenzitická struktura v čočce



NITAL 3%

500x

Obr. 3-17a Přechodová oblast mezi čočkou a materiálem



NITAL 3%

1000x

Obr. 3-17b Martenzit v přechodové oblasti

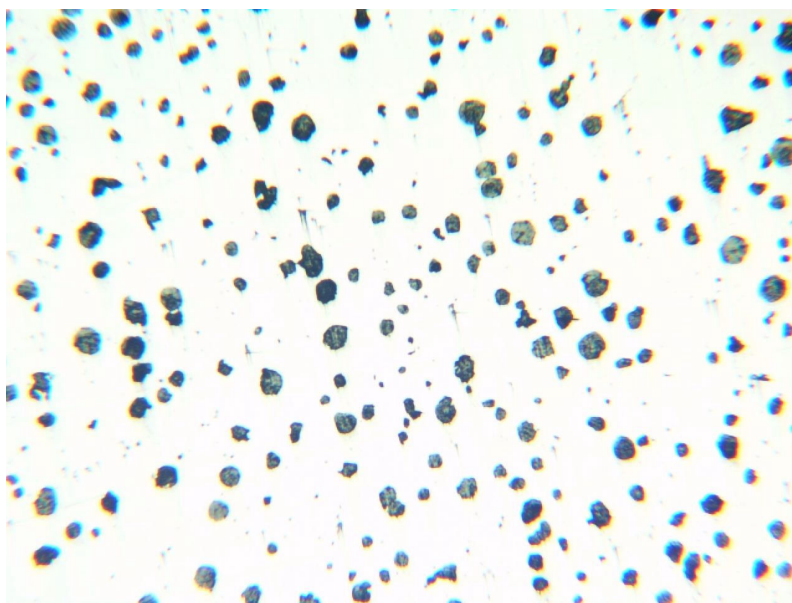
3.2.3 Hodnocení výchozího stavu litiny s kuličkovým grafitem

Pro laserové záření byla použita litina s kuličkovým grafitem s mezním obsahem prvků uvedená v tabulce 3-3.

Tabulka 3-3

	Obsah prvků [%]				
Prvek	C	Si	Mn	P	S
	3,78	2,84	0,31	0,057	0,005
Prvek	Ti	Cr	Mg		
	0,023	0,05	0,062		

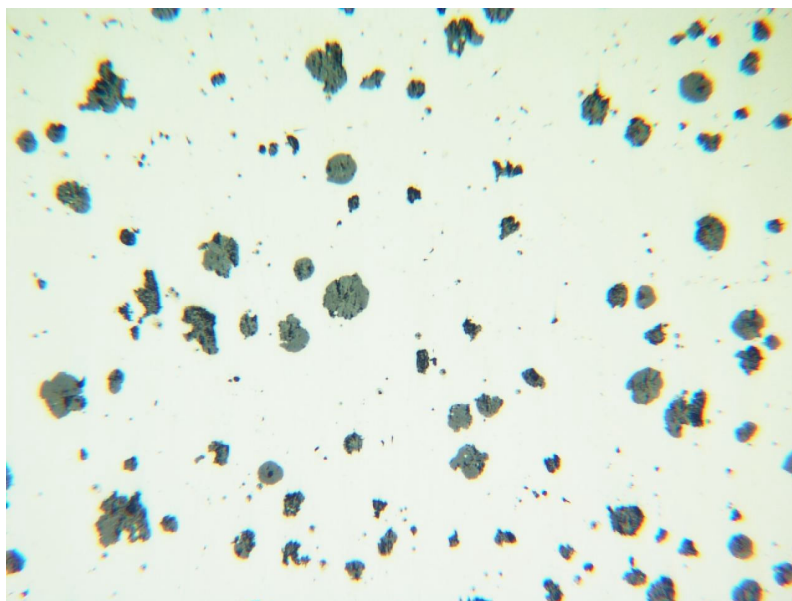
Rozborem struktury litiny s kuličkovým grafitem byly zjištěny tyto hodnoty: Útvary grafitu lze popsat jako pravidelně zrnité o velikosti zrn 30 do 60 μm ; označení dle etalonové řady V5 90% a V6 10%. Základní kovová matrice litiny je feriticko-perlitická. Disperzita lamelárního perlitu se pohybuje od 1,3 do 1,6 μm . Strukturu litiny ukazuje obrázek 3-18a,b



Neleptáno

100x

Obr. 3-18a Mikrostruktura litiny s kuličkovým grafitem



Neleptáno

250x

Obr. 3-18b Základní struktura litiny s kuličkovým grafitem

3.2.3.1 Vyhodnocení vzorků z litiny s kuličkovým grafitem po ozáření laserem

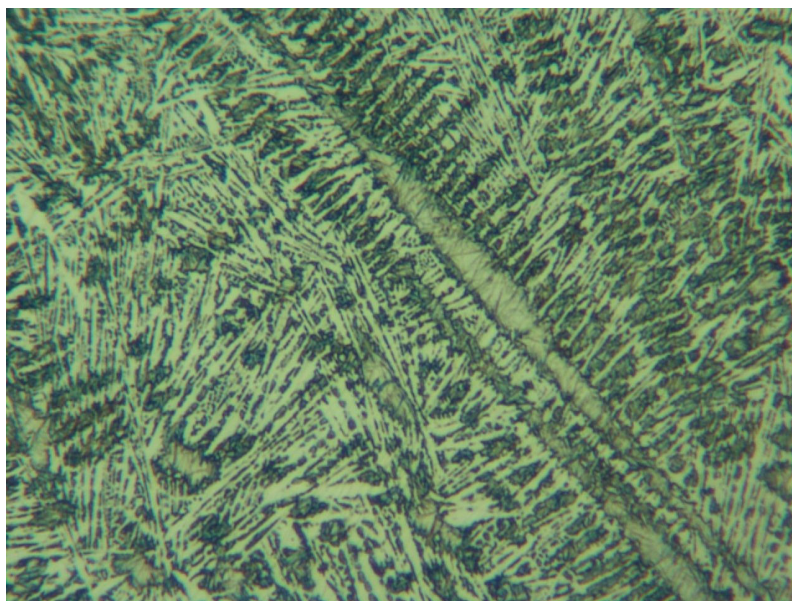
Vzorek č.1

Rychlost posuvu laserového paprsku	0,010 m.s ⁻¹
Výkon laserového paprsku	2 kW
Max. hloubka stopy	0,78 mm
Max. šířka stopy	5,26 mm

I u tohoto vzorku litiny byla pozorována ovlivněná oblast tvaru čočky, tvořená oblastí natavení a oblastí tepelného zpracování.

Oblast natavení je velká 0,22 mm a byla v ní zjištěna dendritická struktura metastabilního eutektika s malým množstvím grafitických vyloučenin. Většina dendritů je opět orientována ve směru teplotního gradientu, jak je patrné na obrázku 3-19..

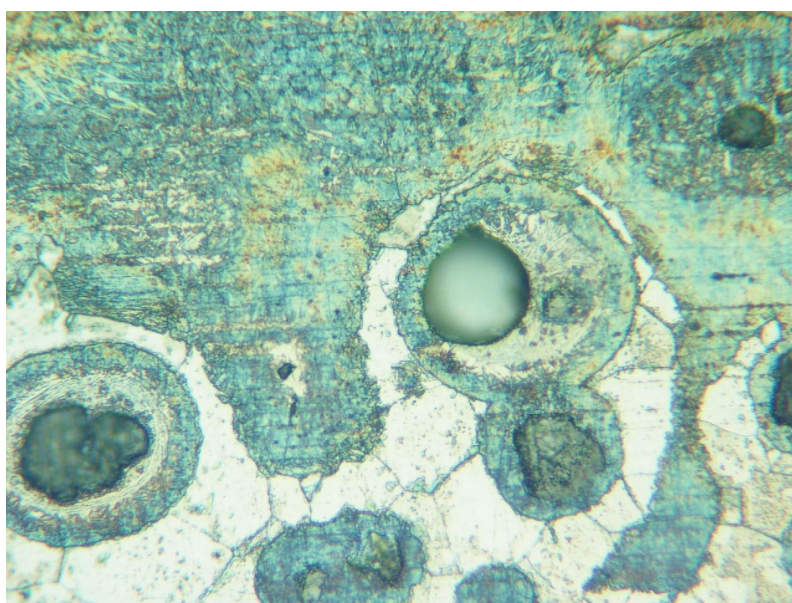
Oblast tepelného zpracování tvoří v blízkosti ledeburitické struktury vyloučeniny grafitu, které obklopují obálky ledeburitu a jsou vyplněny martenzitem, což ukazují obrázky 3-20a,b.



NITAL 3%

1000x

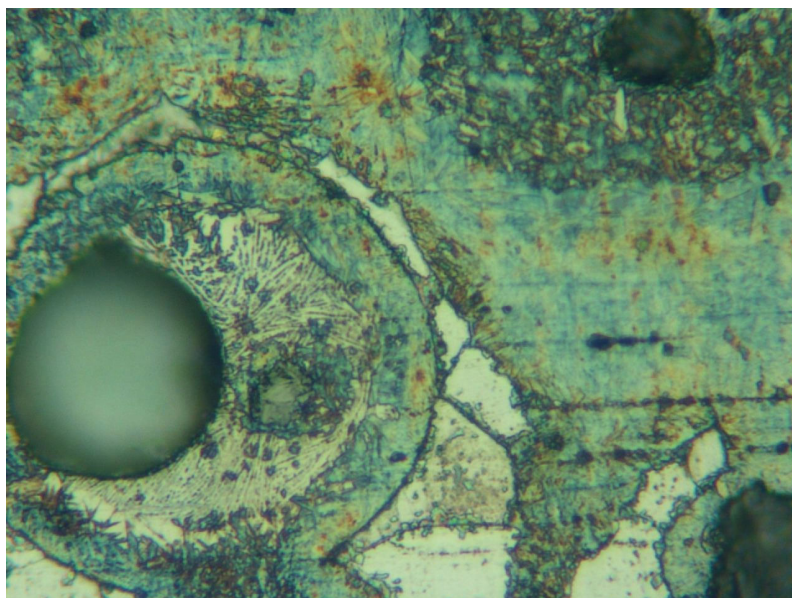
Obr.3-19 Ledeburitická struktura oblasti natavení



NITAL 3%

500x

Obr.3-20a Přechod mezi martenzitem a základní kovovou hmotou vzorku



NITAL 3%

1000x

Obr.3-20b Ledeburitická struktura obklopená
martenzitem

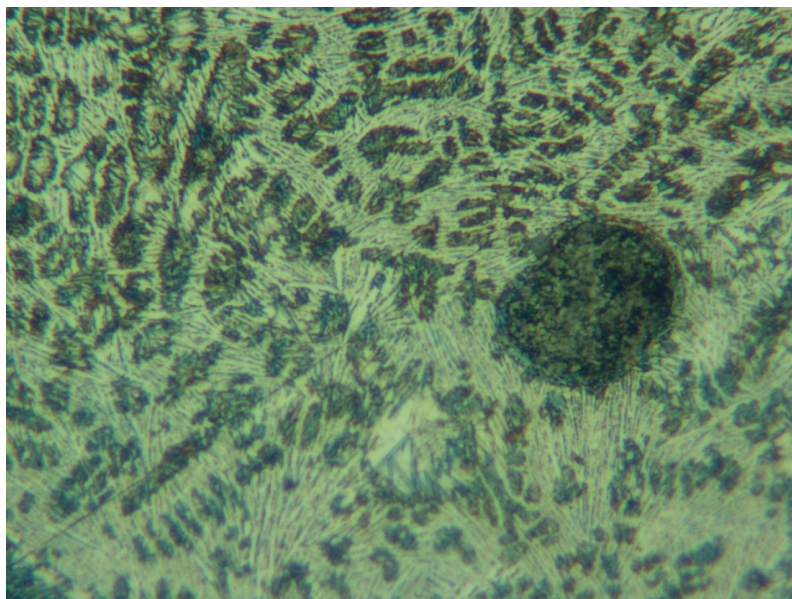
Vzorek č.2

Rychlost posuvu laserového paprsku	.....	0,0133 m.s ⁻¹
Výkon laserového paprsku	.....	2 kW
Max. hloubka stopy	.....	0,74 mm
Max. šířka stopy	.....	5,15 mm

I u druhého vzorku litiny s kuličkovým grafitem byla pozorována ovlivněná oblast tepelného zpracování ve tvaru kruhové úseče.

Oblast natavení je tvořena ledeburitickou strukturou s malým množstvím grafitických vyloučenin, které se nestačily rozpustit , jak ukazuje obr. 3-21 a dosahuje hloubky až 0,2 mm.

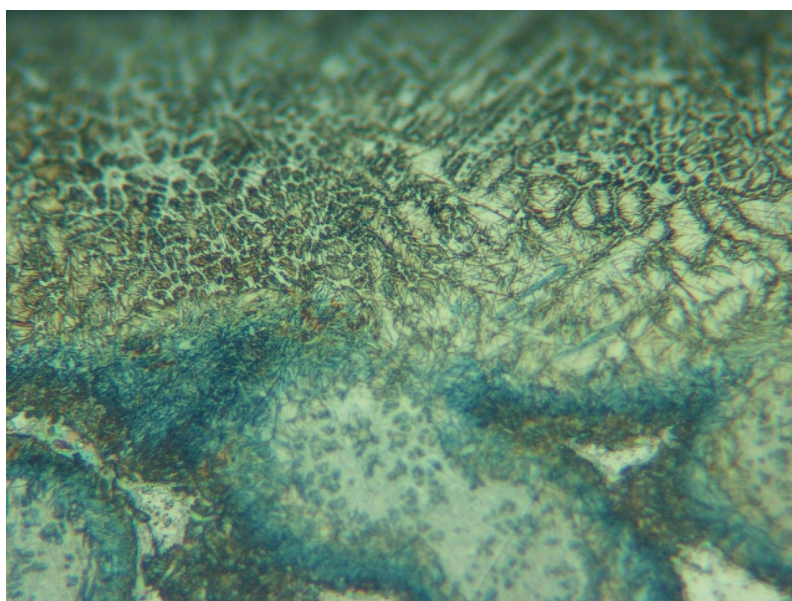
Oblast tepelného zpracování má hloubku 0,54 mm a je tvořena vyloučeninami grafitu v okolí ledeburitických eutektik, viz obr. 3 - 22. Prostor mezi nimi vyplňuje martenzitická struktura, viditelná na obrázku 3-23, která přechází do základní kovové hmoty litiny s kuličkovým grafitem.



NITAL 3%

1000x

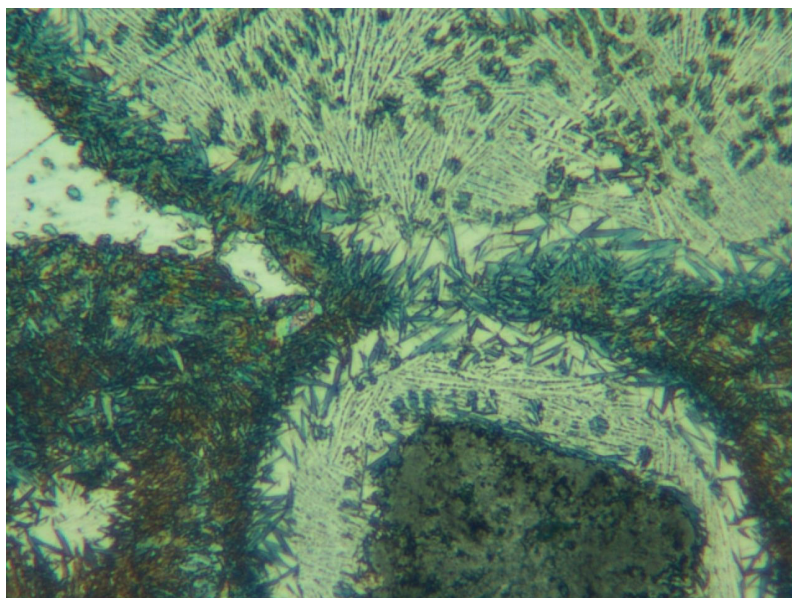
Obr.3-21 Ledeburitická struktura



NITAL 3%

500x

Obr.3-22 Přechod mezi oblastí natavení a oblastí tepelného zpracování



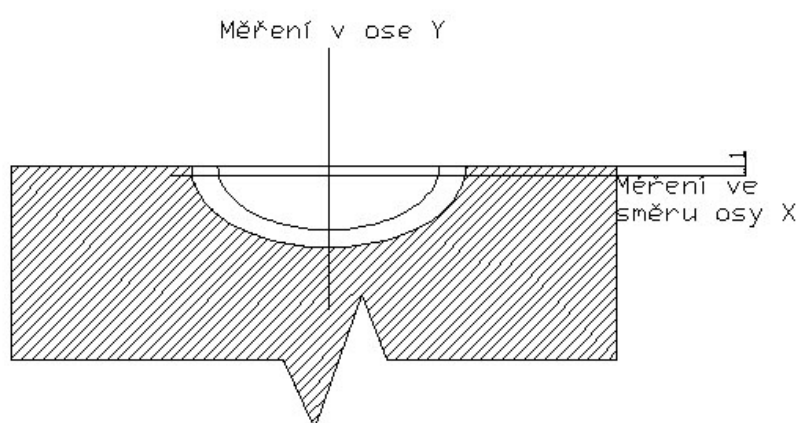
NITAL 3%

1000x

Obr.3-23 Ledeburitická struktura obklopená
martenzitem

3.3 Hodnocení mikrotvrlosti

Pro doplnění výsledků sledované mikrostruktury vzorků litiny byla měřena mikrotvrдость v rovině X a Y, jak je vidět na obrázku 3 – 24. Analýza proběhla na tvrdoměru firmy ZWICK : Hardness Tester ZWICK 3212 při použitím zatížení 2N.



Obr. 3 – 24 Schéma příčným řezem ozářeného vzorku
s vyznačením míst měření mikrotvrlosti

Základní tvrdost litiny s lupínkovým grafitem byla naměřena 185 HV_{0,2}.

Vzorek LLG-1

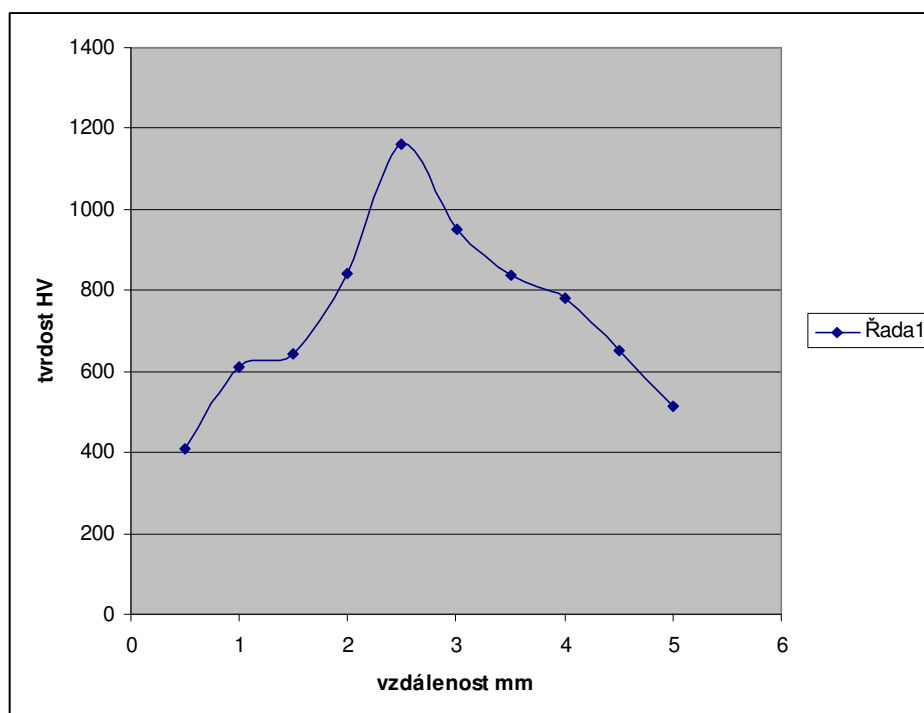
Rychlost posuvu laserového paprsku 0,01 m.s⁻¹
 Výkon laserového paprsku 2 kW

Tabulka 3-4 Naměřené hodnoty v ose X

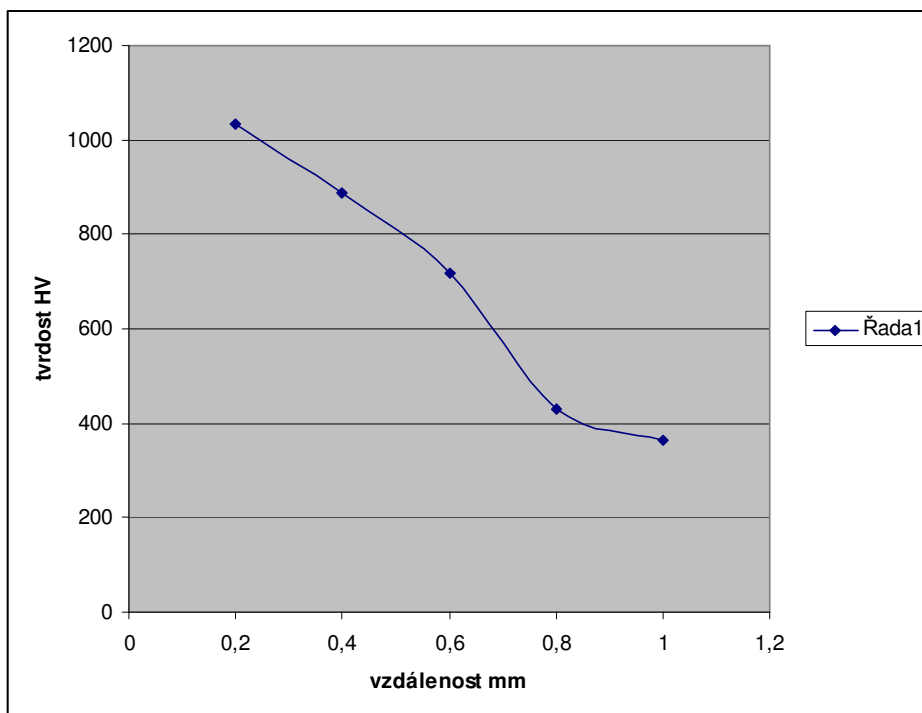
Vzdálenost mm	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrdost HV _{0,2}	407	613	643	841	1163
Vzdálenost mm	3	3,5	4	4,5	5
Tvrdost HV _{0,2}	950	836	782	651	512

Tabulka 3-5 Naměřené hodnoty v ose Y

Vzdálenost mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Tvrdost HV _{0,2}	1035	887	718	431	363



Obr. 3-25 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose X ozářeného vzorku litiny laserem



Obr. 3-26 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose Y ozářeného vzorku litiny laserem

Vzorek LLG-2

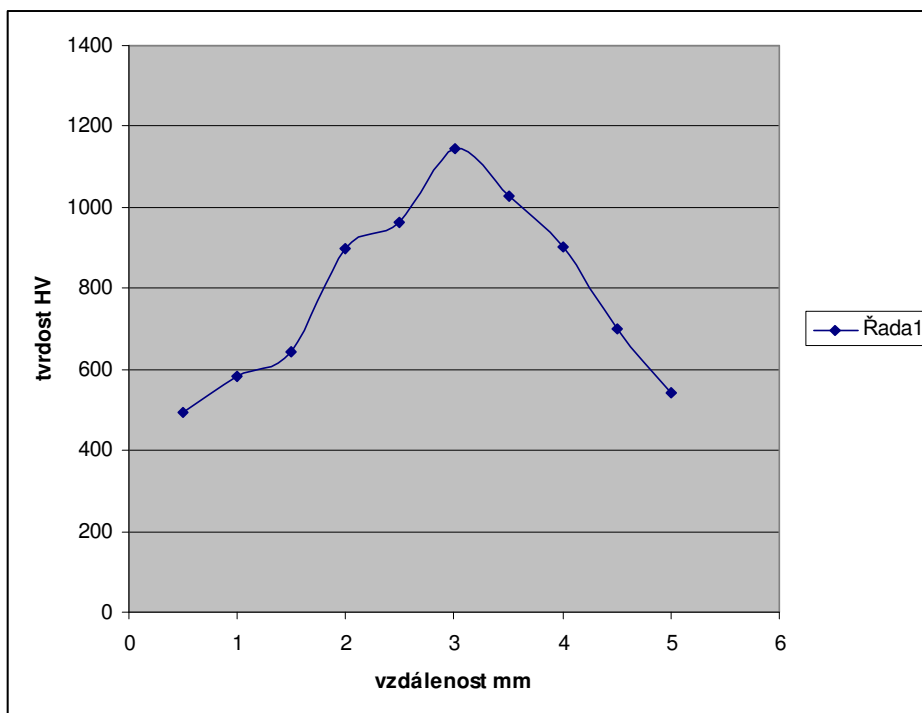
Rychlost posuvu laserového paprsku 0,013 m.s⁻¹
 Výkon laserového paprsku 2 kW

Tab. 3-6 Naměřené hodnoty v ose X

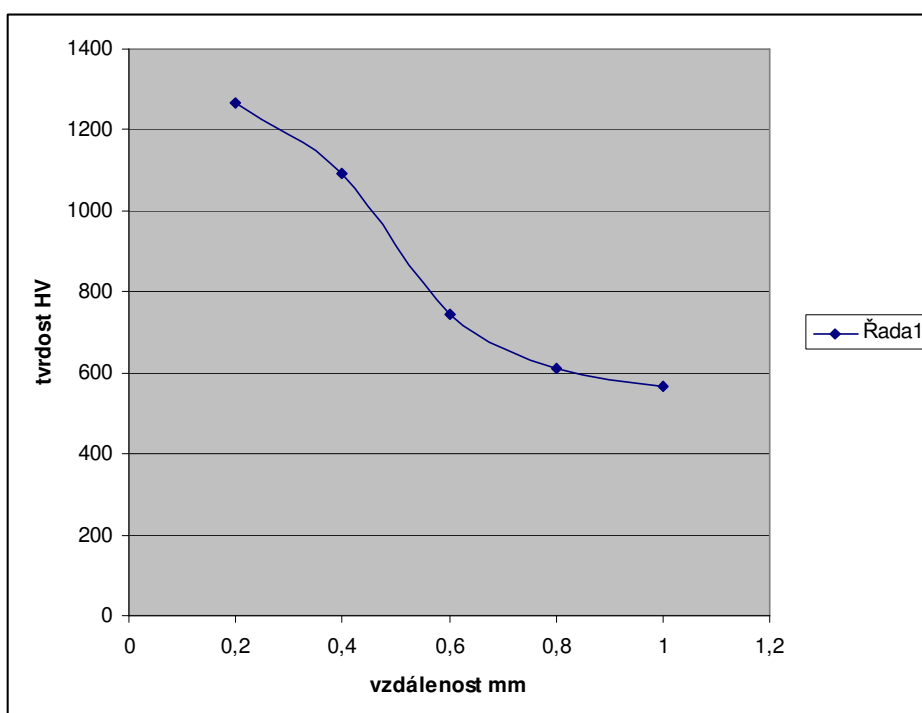
Vzdálenost mm	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrdost HV0,2	493	581	643	898	964
Vzdálenost mm	3	3,5	4	4,5	5
Tvrdost HV0,2	1147	1026	901	701	543

Tab. 3-7 Naměřené hodnoty v ose Y

Vzdálenost mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Tvrdost HV0,2	1268	1093	745	612	566



Obr. 3-27 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose X ozářeného vzorku litiny laserem



Obr. 3-28 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose Y ozářeného vzorku litiny laserem

Vzorek LLG-3

Rychlost posuvu laserového paprsku 0,015 m.s⁻¹

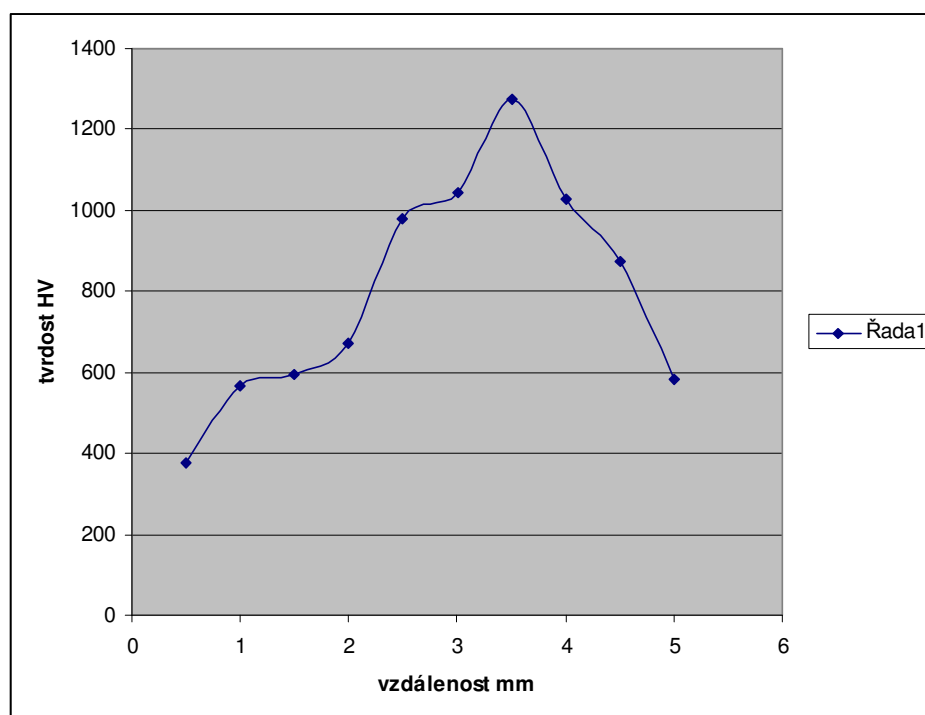
Výkon laserového paprsku 2 kW

Tab. 3-8 Naměřené hodnoty v ose X

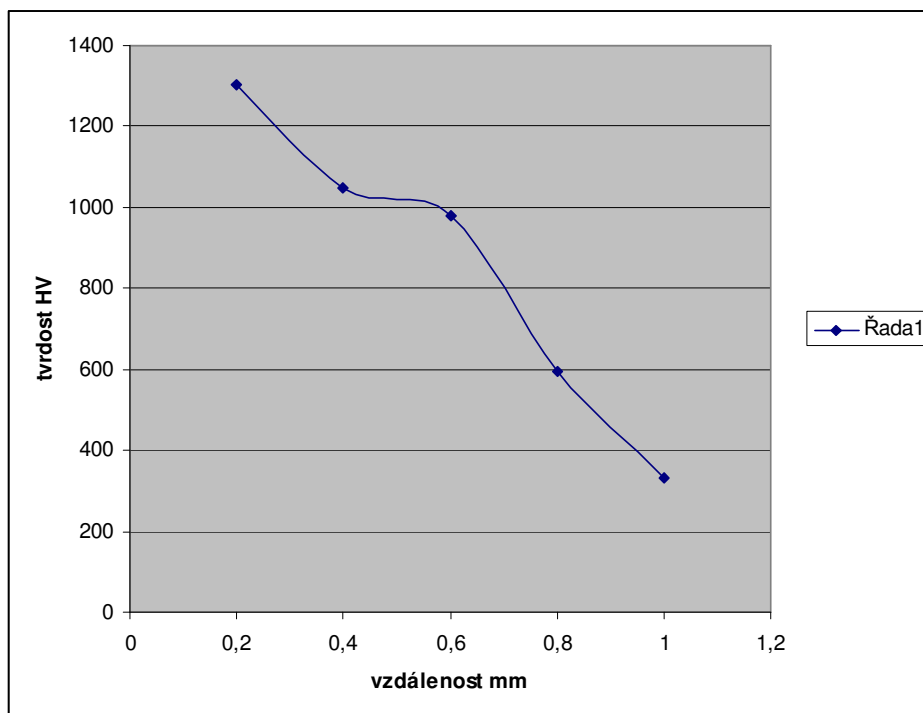
Vzdálenost mm	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrđost HV0,2	376	565	596	672	981
Vzdálenost mm	3	3,5	4	4,5	5
Tvrđost HV0,2	1044	1276	1029	874	582

Tab. 3-9 Naměřené hodnoty v ose Y

Vzdálenost mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Tvrđost HV0,2	1304	1047	981	594	331



Obr. 3-29 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose X ozářeného vzorku litiny laserem



Obr. 3-30 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose Y ozářeného vzorku litiny laserem

Základní tvrdost litiny s červíkovým grafitem byla naměřena v rozmezí 150 ~ 240HV_{0,2}.

Vzorek LČG-1

Rychlost posuvu laserového paprsku 0,0066 m.s⁻¹

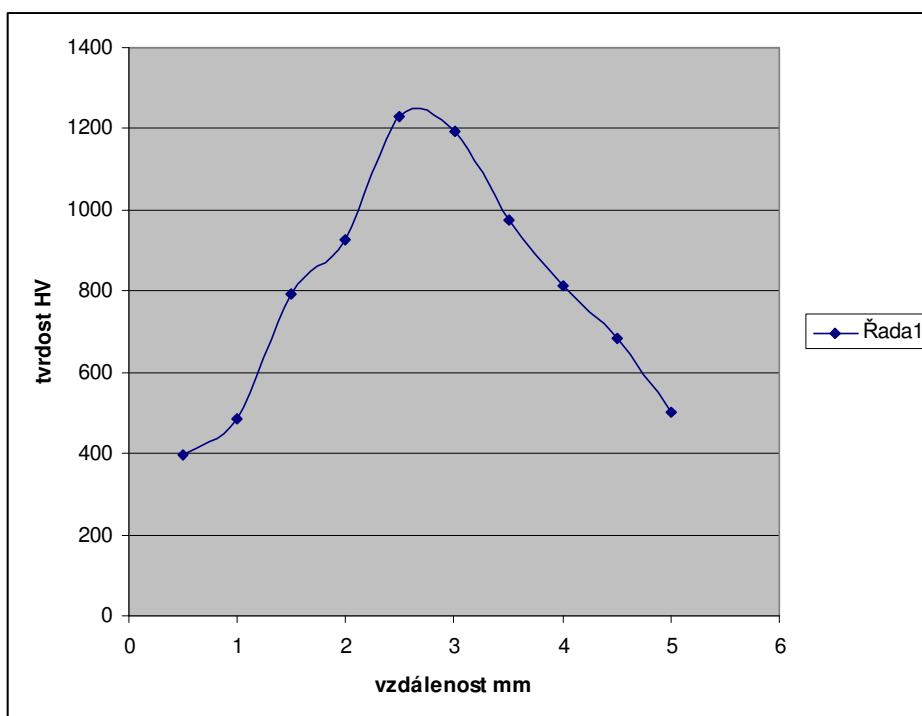
Výkon laserového paprsku 2 kW

Tab. 3-10 Naměřené hodnoty v ose X

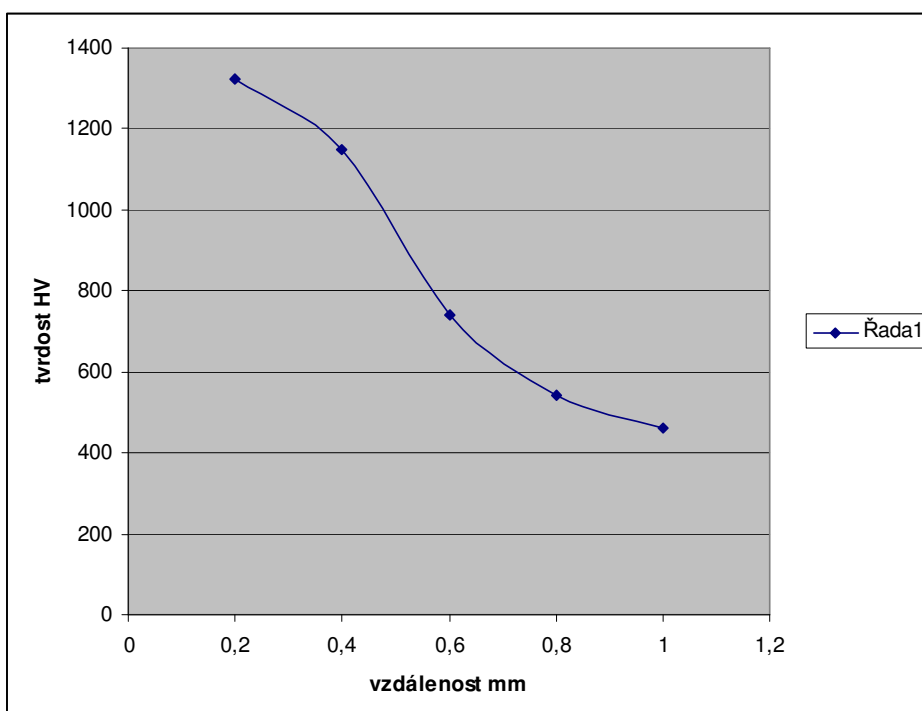
Vzdálenost mm	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrdość HV _{0,2}	398	484	795	928	1231
Vzdálenost mm	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrdość HV _{0,2}	398	484	795	928	1231

Tab. 3-11 Naměřené hodnoty v ose Y

Vzdálenost mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Tvrdość HV _{0,2}	1325	1150	740	541	463



Obr. 3-31 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose X ozářeného vzorku litiny laserem



Obr. 3-32 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose Y ozářeného vzorku litiny laserem

Vzorek LČG-2

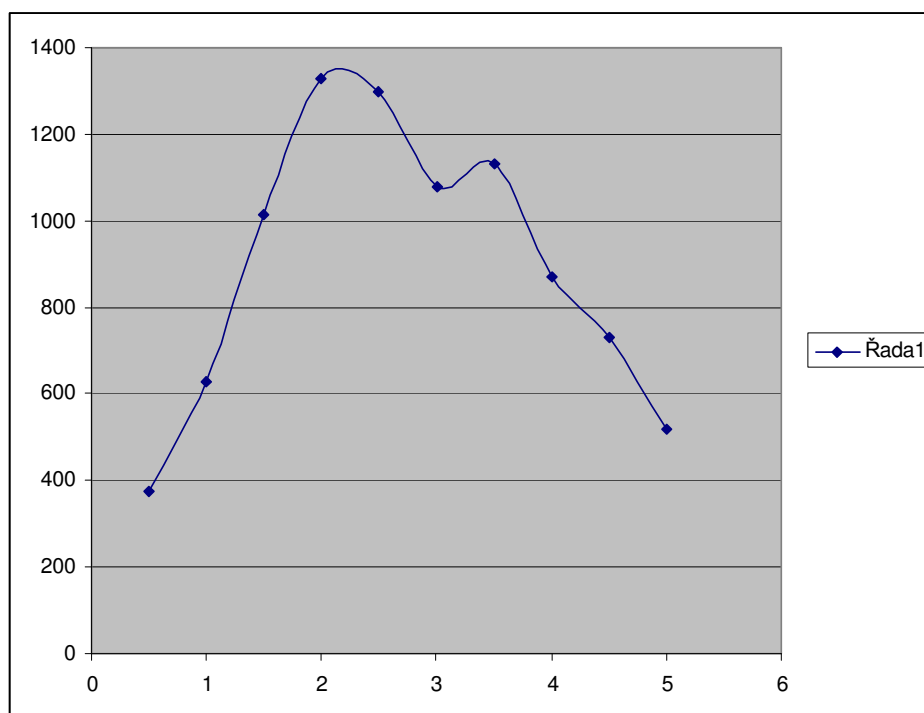
Rychlost posuvu laserového paprsku 0,01 m.s⁻¹
 Výkon laserového paprsku 2 kW

Tab. 3-12 Naměřené hodnoty v ose X

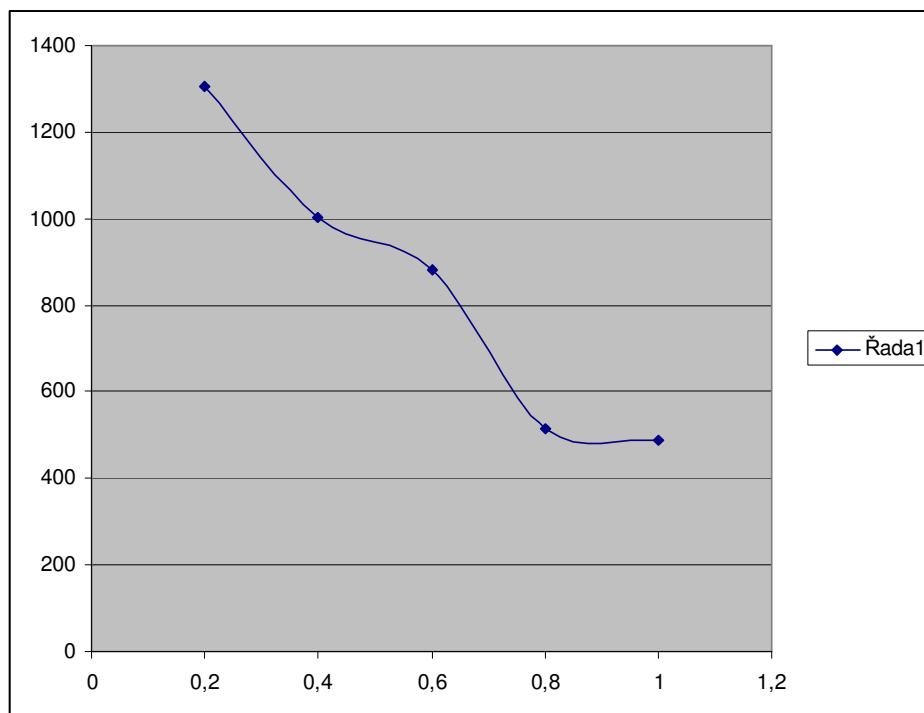
Vzdálenost mm	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrdość HV0,2	373	628	1015	1329	1296
Vzdálenost mm	3	3,5	4	4,5	5
Tvrdość HV0,2	1080	1131	872	730	518

Tab. 3-13 Naměřené hodnoty v ose Y

Vzdálenost mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Tvrdość HV0,2	1304	1001	882	513	487



Obr. 3-33 Grafická závislost tvrdosti na vzdálenosti v ose X ozářeného vzorku litiny laserem



Obr. 3-34 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose Y ozářeného vzorku litiny laserem

Naměřená tvrdost základního materiálu litiny s kuličkovým grafitem byla v rozmezí 165 ~ 240 HV0,2

Vzorek LKG-1

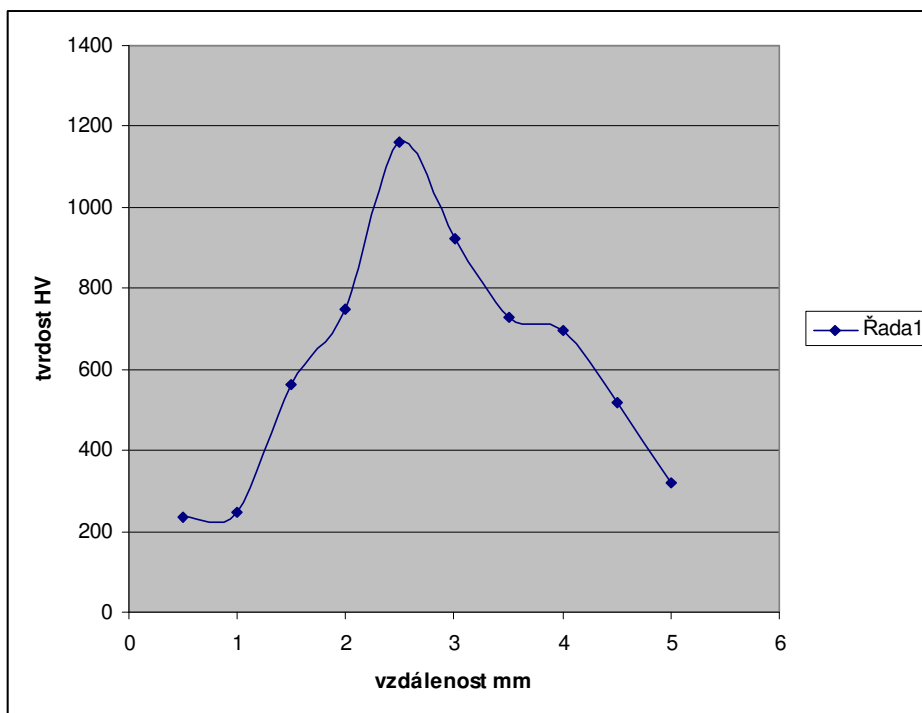
Rychlost posuvu laserového paprsku 0,010 m.s⁻¹
Výkon laserového paprsku 2 kW

Tab. 3-14 Naměřené hodnoty v ose X

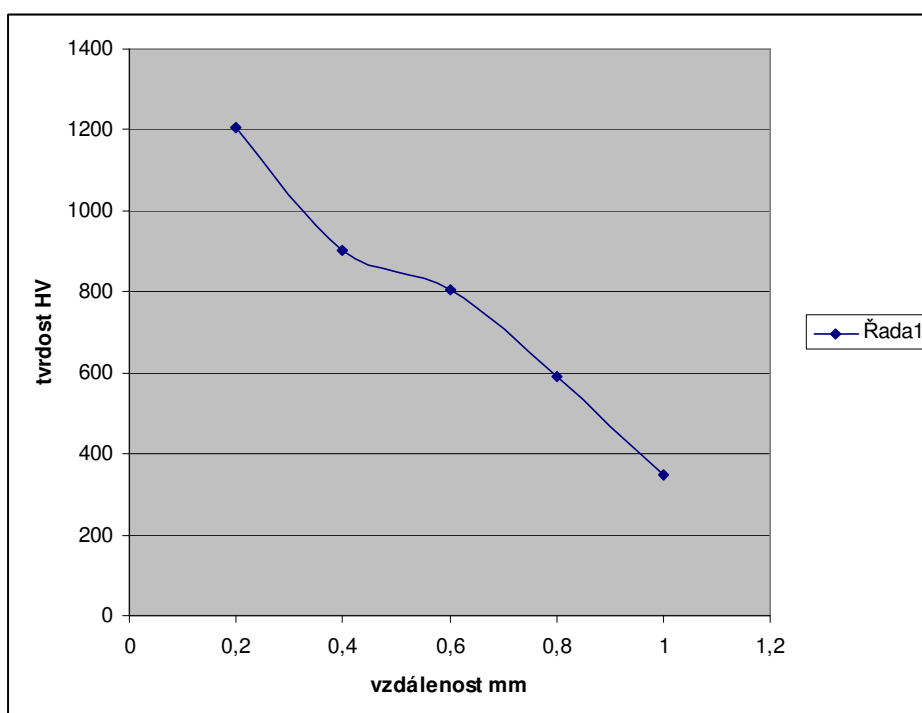
Vzdálenost mm	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrdość HV0,2	234	246	563	749	1163
Vzdálenost mm	3	3,5	4	4,5	5
Tvrdość HV0,2	923	729	694	518	321

Tab. 3-15 Naměřené hodnoty v ose Y

Vzdálenost mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Tvrdość HV0,2	1205	904	806	589	347



Obr. 3-35 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose X ozářeného vzorku litiny laserem



Obr. 3-36 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose Y ozářeného vzorku litiny laserem

Vzorek LKG-2

Rychlost posuvu laserového paprsku 0,0133 m.s⁻¹

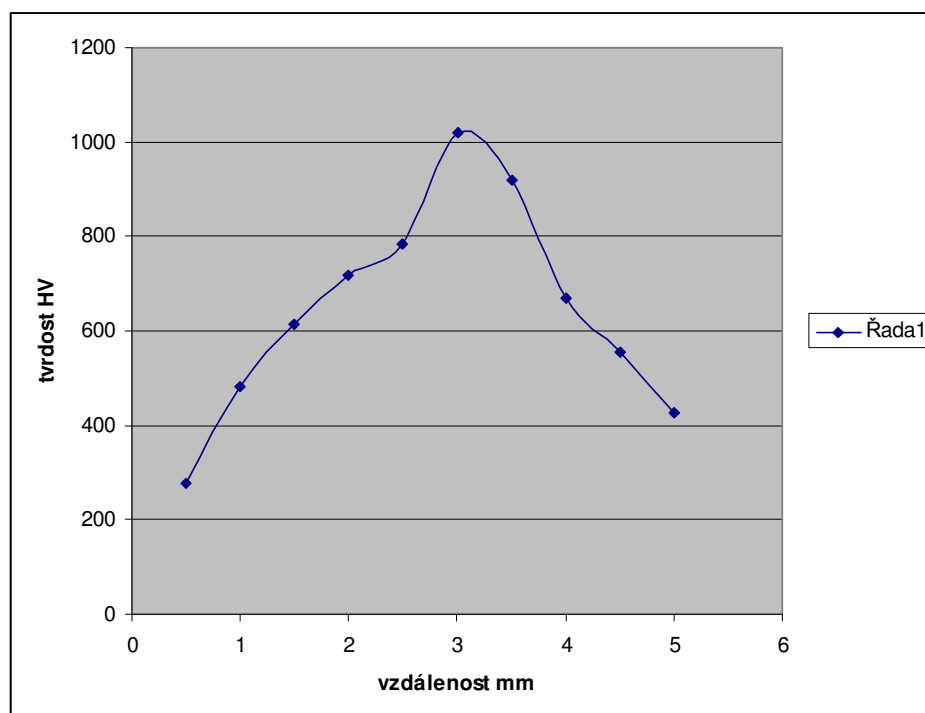
Výkon laserového paprsku 2 kW

Tab. 3-16 Naměřené hodnoty v ose X

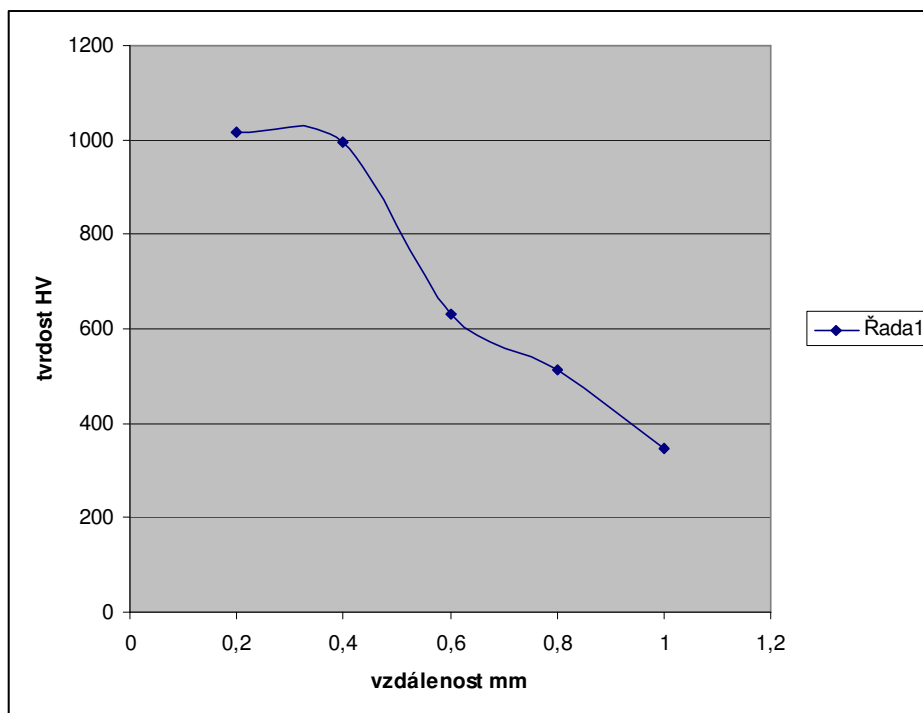
Vzdálenost mm	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrдост HV0,2	277	483	615	718	784
Vzdálenost mm	3	3,5	4	4,5	5
Tvrдост HV0,2	1021	920	668	555	428

Tab. 3-17 Naměřené hodnoty v ose Y

Vzdálenost mm	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Tvrдост HV0,2	1015	994	631	513	348



Obr. 3-37 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose X ozářeného vzorku litiny laserem



Obr. 3-38 Grafická závislosti tvrdosti na vzdálenosti v ose X ozářeného vzorku litiny laserem

4. Diskuze výsledků

Výsledky uvedené v této práci přináší další poznatky, které lze využít pro posouzení vhodnosti použití technologického procesu tepelného ozáření litiny laserem.

Obecně lze tepelné zpracování litin laserovými paprsky popsat jako polyvariantní funkci s vzájemně provázanými parametry. S těmito úvahami je proto nutné přijímat i získané výsledky, které můžeme rozdělit následovně:

Vhodnost litin pro laserové tepelné zpracování také mimo jiné souvisí s tepelnou a teplotní vodivostí. Např. tepelná vodivost grafitu je největší ve směru hlavní osy /0001/ a z toho také vyplývá, nehledě na základní charakter kovové hmoty, že největší tepelnou vodivost bude mít litina s lupínkovým grafitem, a že litina s kuličkovým grafitem vykazuje strmější teplotní gradient. V důsledku pomalejšího rozpouštění globulárního grafitu může dojít k přehřátí povrchu. Důsledkem čehož je větší odezva na tepelné zpracování u litiny s kuličkovým grafitem než u litiny s lupínkovým grafitem.

Všechny ozářené vzorky litin, které byly podrobeny analýze v této diplomové práci vykazují v příčném směru na posuv laserového paprsku strukturně ovlivněnou oblast čočkovitého tvaru, tvořenou dvěma zónami:

- 1) zónou natavení;
- 2) zónou tepelného zpracování.

Zóna tepelného zpracování pozvolně přechází do struktury základního materiálu.

Hodnocení vzorků z litiny s lupínkovým grafitem ozářených laserem

Laserovému záření byly podrobeny tři vzorky z litiny s lupínkovým grafitem, které byly připraveny kontinuálním litím.

Vzorek č. 1 ozářený laserovým paprskem o rychlosti posuvu $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ o výkonu 2kW. Zde byla zjištěna šířka ovlivněné oblasti 5mm. Zóna natavení je hluboká 0,4 mm a je tvořena dendritickou strukturou metastabilního eutektika a dendrity natočenými do směru největšího gradientu teploty. Tvrdost této oblasti se pohybuje kolem 1035 HV_{0,2}.

Druhá zóna je tvořena martenzitickou strukturou s přítomností lupínků grafitu. Tvrdost této oblasti se pohybuje mezi 200 až 800HV_{0,2}.

Vzorek č. 2 ozářený laserovým paprskem o rychlosti $0,013 \text{ m.s}^{-1}$ a výkonu 2kW. Šířka stopy dosahuje 4,9 mm. Zóna natavení má typickou strukturu metastabilního eutektika bez výrazného směrového uspořádání. Maximální tvrdost v této zóně je 1268HV_{0,2}.

Zóna tepelného zpracování je tvořena martenzitickou strukturou s přítomností grafitových lupínků. Tvrdost v této oblasti je mezi 220HV_{0,2} a 770HV_{0,2}.

Vzorek č. 3 ozářený laserovým paprskem o rychlosti $0,015 \text{ m.s}^{-1}$ o výkonu 2kW. Maximální šířka stopy je 4,8 mm. Oblast natavení je tvořena dendritickou strukturou metastabilního eutektika bez výrazného směrového uspořádání. Tvrdost oblasti dosahuje 1300HV_{0,2}.

Druhá oblast tepelného zpracování má martenzitickou strukturu s přítomností grafitových lupínků. Tvrdost této oblasti dosahuje od 200HV_{0,2} do 900HV_{0,2}.

Hodnocení vzorků z litiny s červíkovitým grafitem ozářených kontinuální laserem

Tyto vzorky, jak je výše uvedeno, jsou označeny čísly 4 a 5, byly vytvořeny působením kontinuálního laseru na litinu s červíkovým grafitem.

Vzorek č. 4 ozářený laserovým paprskem o rychlosti $0,0066 \text{ m.s}^{-1}$ a výkonu 2kW.

V oblasti natavení se vyskytuje ledeburitická struktura s malým množstvím vyloučeného nedokonale globulárního grafitu. Dendritická struktura metastabilního eutektika je tvořena dendrity natočenými převážně ve směru největšího odvodu tepla. Tvrdost oblasti dosahuje 1300HV_{0,2}.

Druhá oblast je tvořena martenzitickou strukturou která obklopuje ledeburit v oblasti natavení. Tvrdost v naměřená v této oblasti dosahuje 200 až 700HV_{0,2}.

Vzorek č.5 ozářený laserovým paprskem o rychlosti $0,01 \text{ m.s}^{-1}$ a výkonu 2kW.

Ovlivněná oblast má tvar kruhové úseče. Oblast natavení tvoří ledeburitické struktura, v níž se nachází nedokonale rozpuštěný globulární grafit. Dendritická struktura je převážně orientována ve směru teplotního gradientu. Tvrdost naměřená v této oblasti dosahuje 1304HV_{0,2}.

Druhá oblast je tvořena martenzitickou strukturou obklopující ledeburit. Tvrdost v této oblasti dosahuje 200 až 880HV_{0,2}.

Hodnocení vzorků z litiny s kuličkovým grafitem ozářených laserem

K ozáření laserem byly použity vzorky z litiny s kuličkovým grafitem, označené č. 6 a č. 7.

Vzorek č. 6 byl ozářen laserovým paprskem o rychlosti $0,010 \text{ m.s}^{-1}$ a výkonu 2kW.

Pozorovaná oblast tvaru čochy je tvořená dvěma oblastmi. Oblast natavení je tvořena dendritickou strukturou metastabilního eutektika s malým množstvím grafitických vyloučenin. Většina dendritů je orientována ve směru teplotního gradientu. Tvrdost oblasti dosahuje 1205 HV_{0,2}.

Druhou oblast, tepelného zpracování, tvoří martenzit obklopující obálky ledeburitu.

Tvrdost v této oblasti byla naměřena 200 až 850HV_{0,2}.

Vzorek č. 7 vznikl ozářením litiny laserem o rychlosti $0,0133 \text{ m.s}^{-1}$ a výkonu 2kW.

Oblast natavení vzorku tvoří ledeburitická struktura s malým množstvím grafitických vyloučenin. Hodnoty tvrdosti oblasti byly naměřeny až 1021 HV_{0,2}.

Oblast tepelného zpracování je tvořena vyloučeninami grafitu v okolí ledeburitických eutektik, jejichž prostor vyplňuje martenzit. Tvrdost oblasti je mezi 200 až 880 HV_{0,2}.

Chemické složení litin určených k tepelnému zpracování laserem by mělo obsahovat jen malé množství fosforu, protože fosfidické eutektikum se taví na úkor austenitizace a dojde ke vzniku vypálenin po steaditu.

Technologický proces tepelného zpracování základního materiálu laserem přináší do výroby nové možnosti díky možnosti přesné fokusace paprsku a ovlivnění pouze malé oblasti materiálu. Díky tomuto dojde k úspoře energie a zabrání se nechtěnému tepelnému ovlivnění materiálu v oblastech, kde není žádoucí a ve kterých by k ovlivnění došlo při použití konvenčních technologií. Dalším přínosem technologie výroby je její ekologičnost, která vychází ze spotřeby energie na ohřev tenké vrstvy materiálu a použití technologie bez použití zdraví škodlivých chemických látek. Jako zápor této technologie lze hodnotit vysoké počáteční náklady na pořízení výrobního zařízení, zajištění bezpečnosti práce s laserem a vyškolení obsluhy. Vlivů vstupujících do technologického procesu tepelného zpracování laserem je mnoho a v praxi není možné je všechny flexibilně zahrnout do výroby. Proto musí budoucí zpracovatel získat maximum informací o interakci laseru a litiny ještě před počáteční investicí. Tyto informace mohou být získány i z experimentálních akademických prací.

5. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá interakcí paprsku kontinuálního laseru CO₂ s grafitickými litinami.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V části teoretické je proveden rozbor tepelného zpracování materiálů laserem, dále jsou popsány jednotlivé druhy grafitických litin a jejich tepelné zpracování. Rešeršní část byla zpracována na základě prostudování literárních podkladů.

Hlavní část práce – experimentální je zaměřena na sledování vzorků vlastností vybraných typů grafitických litin při jejich ozáření kontinuálním CO₂ laserem o výkonu 2 kW. Jako vzorky byly použity litina s lupínkovým grafitem, litina s červíkovým grafitem a litina s kuličkovým grafitem. Experimentální část je

zaměřena na sledování mikrostruktury vzorků při působení kontinuálního laseru na litiny při rychlostech $0,0066 \text{ m.s}^{-1}$; $0,01 \text{ m.s}^{-1}$; $0,015 \text{ m.s}^{-1}$; $0,015 \text{ m.s}^{-1}$.

Získané poznatky a výsledky lze shrnout do těchto dílčích závěrů:

1) Ozáření grafitických litin laserem umožňuje získání málo typických struktur, které lze získat na jednom litinovém vzorku. Tímto tepelným zpracováním lze získat značnou tvrdost povrchu litinového odlitku, cca až 1300 HV což také souvisí s podmínkami vzniku ledeburitické, a nižší tvrdosti souvisí se vznikem martenzitické struktury.

2) Příprava vzorků pro ozáření je dosti náročná, souvisí s odrazivostí laserového paprsku, proto všechny vzorky před ozářením je nutno povrchově ošetřit (nastříkat) černou matnou barvou, v našich podmínkách označovanou jako **Rallye-Color mat**.

3) Na ozářených vzorcích za výše uvedených podmínek se vždy objevuje tepelně ovlivněná oblast ve tvaru kruhové úseče. Tato tepelně ovlivněná oblast má strukturu ledeburitickou, přecházející do martenzitu a poté do základního materiálu. Pro doplnění informací bylo provedeno i měření tvrdosti mikrostruktury. Ledeburitická struktura vykazuje tvrdost až 1300HV_{0,2}, navazující struktura martenzitická dosahuje tvrdosti až 900HV_{0,2}.

4) Vyšší rychlosti paprsku laseru nepřispívají k tak intenzivnímu prohřátí povrchu litiny, aby došlo k jejímu natavení a tím vzniku ledeburitické struktury. Při rychlostech $0,0066 \text{ m.s}^{-1}$ dochází ještě k natavení povrchu litiny a ke vzniku ledeburitické struktury. Výše kruhové výseče po ozáření laseru za vzniku ledeburitické struktury je až 0,41 mm (při rychlosti paprsku laseru $0,0066 \text{ m.s}^{-1}$). S rostoucí rychlosti postupu laserového paprsku se tato oblast snižuje.

5) Vzorky z litiny s lupínkovým grafitem po ozáření laserem až do natavení vykazují rozpuštění grafitu ve prospěch následné ledeburitické struktury. U vzorků z litiny s červíkovým a kuličkovým grafitem nedochází k úplnému rozpouštění všech částic grafitu, pak je možno v ledeburitické matici v některých místech vzorku sledovat i nerozpuštěný grafit.

6) Mikrotvrdost základního materiálu litin dosahovala 200 HV 0,2. To je 6,5 krát méně, že je tvrdost ovlivněné části litiny s ledeburitickou maticí.

Z důvodu, že se jedná o základní výzkum, nebylo v diplomové práci provedeno ekonomické hodnocení.

Pro další období doporučuji se zaměřit na ozáření litinových vzorků kontinuálním laserem s větší rychlostí tj. od $0,015 \text{ m.s}^{-1}$.

7. Použitá literatura

- [1] AMENDE, V. :Härten vor werkstoffen und Bauteilen des Maschinenbau mit Hochleistung – laser. VDI – verlag 1985, München
- [2] BERGMANN, H.W. et al.: Metallurgical Considerations in the Laser, Surface Melting on Iron base Alloys. Zeitschrift für werkstoff technik 14, 1983, 7
- [3] SKOČOVSKÝ, P. – PODRÁBSKÝ, T.: Grafické liatiny. EDIS ŽU, Žilina 2005.
- [4] SKOČOVSKÝ, P. - ŠIMAN, I.: Štruktúrna analýza liatin. ALFA Bratislava, 1989.
- [5] SKOČOVSKÝ, P. - MATEJKA, M.: Mikroštruktúra liatin - metalografická príručka. Fomplex Trenčín - ES VŠDS, 1994.
- [6] PÍŠEK, F. et al.: Nauka o materiálu, I/4. Praha 1975.
- [7] SKOČOVSKÝ, P. et al.: Konštrukčné materiály. EDIS ŽU, Žilina 2000.
- [8] PLUHAŘ, J. - KORITTA, J.: Strojírenské materiály. 2.vyd., SNTL Praha, 1977.
- [9] PTÁČEK, L. et al.: Nauka o materiálu I, II. CERM Brno, 2002.
- [10] PODRÁBSKÝ, T.: In.: Výroba a vlastnosti oceli na odlitky a tvárné litiny, Brno, 1994, 166.
- [11] VĚCHET, S. - KOHOUT, J. - ŠVEJCAR, J.: In.: Fatigue c99 – Proceedings of the seventh international fatigue congress. 1st ed. Beijing: Higher education press, 1999, vol. 3, 2077-2082.
- [12] VĚCHET, S. - KOHOUT, J.: Vysokocyklové únavové vlastnosti litin s kuličkovým grafitem – I. část. Slévárství 37 (1999) 11-12, 638-64. Tvárná litina, příloha čas. Slévárství, 1993, srpen, vyd. Svaz sléváren Brno.
- [13] DORAZIL, E.: Vysokopevná bainitická tvárná litina- Praha Academia, 1985.
- [14] Věchet, S. - Kohout, J.- BOKŮVKA, O.: Únavové vlastnosti tvárné litiny. 2.vyd. EDIS ŽU, Žilina 2002.
- [15] PACAL, B. – DOLEŽAL, P.: Studijní opora Slitiny stabilní soustavy Fe-C, dostupné z URL http://ime.fme.vutbr.cz/studijni_opory.html
- [16] PACAL, B. – DOLEŽAL, P.: Studijní opora Slitiny metastabilní soustavy Fe-Fe₃C, dostupné z URL http://ime.fme.vutbr.cz/studijni_opory.html

- [17] CAM, G., ERIM, S., YENI, C., KOCAK, M. Determination of Mechanical and Fracture Properties of Laser Beam Welded Steel Joints. Welding Research Supplement. June 1999.
- [18] ECKEL, F. Laser im Karosseriebau. Praxis-Forum, 1997.
- [19] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., PAŇÁK, R. Strojírenská technologie 2, Polotovary a jejich technologičnost, 1. díl. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-7183-117-4
- [20] KLIMEŠ, K. Laser [online]. 2000, poslední revize: 22.3.2003. Dostupné z URL: <<http://www.mendelova.cz/pages/didac/f/laser.htm>>
- [21] KORUK, A. I. Laser Welding of Thinn Sheets. Slovak University of Technology, Trnava, 2002.
- [22] KRÁTKÝ, I. Laserové povrchové tepelné spracovanie kovov. Strojnícka fakulta SVŠT, Bratislava.
- [23] KRISTENSEN, J. K. Trendy vývoja vo zváraní a príbuzných procesoch. Zváranie, roč. 51, 11-12, 2002. ISSN 0044-5525
- [24] KRUNCIPÁL, J. Teorie svařování. Praha: SNTL, Bratislava: Alfa, 1986. 04-211-86
- [25] TŘEŠŇÁK K. Principy laserů a jejich rozdělení [online]. 2001, poslední revize: 22.3.2003. Dostupné z URL: <http://www.printing.cz/art/ctp/ctp_principy_laseru.html>
- [26] VASILKO, K. a kol. Nové materiály a technológie ich spracovania. Bratislava: Alfa, 1990. SBN 80-05-00661-6
- [27] ZATLOUKAL P. Laser ve strojírenství [online]. 2001, poslední revize: 22.3.2003. Dostupné z URL: <http://www.welding.cz/laser/laser.htm>
- [28] Přehled spekter LASERu dostupný z URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [29] PLUHAŘ, J. a kol. :Nauka o materiálech, 1. vydání, Praha 1989
- [30] BUNIN, K.P. aj. : Struktura čuguna; Mašgiz Moskva 1952
- [31] ENGEL, S.L. : Basic of Laser Heat Treating American Mechanist, 1976
- [32] CHEN, C.N. et al.: Laser Processing of část Iron fer Enhancod Erosion Resistance Metallurgical Transdactions 1SA, 1983
- [33] JAKOVLEV, S.V.: Kvantovaja fizika tvrzardovo těla. Moskva, Nauka 1983
- [34] JOST, W.N. :Laser Processing and Analysis of Materials, Plenum Prcss, New York, 1983

- [35] KOKORA, A.N. – ZHUKOV, A.A., EPSHTEIN, L.Z. : Fiz Obrabotka materialov. 1977
- [36] SNĚŽNOJ, R.L., i dr.: Metal Sciences and Heat Treatment 22, 1980
- [37] SEAMAN, F.D. – GNANAMUTHU, D.S. : Using the Industrial laser and Alloy. Metal Progress, 1978
- [38] ŠÍMAN, I.: Využití laseru pro technologické aplikace ve strojírenství. In : Sborník přednášek z VIII. Celostátního semináře z cyklu Experimentální metody ve fyzikální metalurgii. Liberec, září 1987
- [39] TRAFFORD, D.N.N. et al. : Laser Treatment of Grey Iron Heat Treatment of Metals, 1982
- [40] U. de Oliveira, V. Ocelík, J.Th.M. De Hosson, Surf. Coat. Technol. 197 (2005) 127.
- [41] C.S. Xie, Surf. Coat. Technol. 113 (1999) 1.
- [42] U. de Oliveira, V. Ocelík, J.Th.M. De Hosson. Microstresses and microstructure in thick cobalt-based laser deposited coatings, Surf. Coat. Technol., in press.
- [43] U. de Oliveira, V. Ocelík, J.Th.M. De Hosson. Dry sliding wear behaviour of Co-based laser clad coatings at elevated temperatures, in press.
- [44] Y. Zhang, Y. Chen, R. He, B. Shen, Wear 166 (1993) 179–186.
- [45] B. Shen, Y. Chen, Y. Zhang, Y. Zhang, Chin. J. Iron Steel Res. 9 (1997) 47–50.
- [46] H. Kou, B. Shen, Y. Zhang, Y. Chen, Chin. HotWorking Technol. 6 (1997) 14–15.
- [47] X. Jia, L.Q. Ren, B.C. Chen, Chin. J. Mater. Res. 10 (1996) 556–560.
- [48] H. Zhou, Z.H. Zhang, L.Q. Ren, Q.F. Song, L. Chen, Surf. Coat. Technol. 200 (2006) 6758–6764.
- [49] H. Zhou, Y. Cao, Z.H. Zhang, L.Q. Ren, X.Z. Li, Mater. Sci. Eng. A 433 (2006) 144–148.
- [50] H. Zhou, L. Chen, W. Wang, L.Q. Ren, H.Y. Shan, Z.H. Zhang, Mater. Sci. Eng. A 412 (2005) 323–327.
- [51] L. Chen, H. Zhou, Y. Zhao, L.Q. Ren, X.Z. Li, J. Mater. Process Technol. 190 (2007) 211–216.

- [52] STOLAŘ a kol.: Studium natavení povrchových vrstev ocelí a šedé litiny pomocí laseru. In : Sborník přednášek z VIII. Celostátního semináře z cyklu Experimentální metody ve fyzikální metalurgii. Liberec, září 1987

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv
užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti
informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu
nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě
konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature